

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
MARIE-ÈVE VADNAIS

ANALYSE DE L'ÉVOLUTION HYDRO-MORPHOLOGIQUE
DE LA RIVIÈRE SAINT-MAURICE EN AVAL DE
LA CENTRALE LA GABELLE (QUÉBEC, CANADA)

JANVIER 2012

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Nous n'héritons pas de la Terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants.

- Antoine de Saint-Exupéry

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Ali Assani pour son soutien constant et sa grande disponibilité tout au long de ce laborieux travail. Je remercie également mon codirecteur, le professeur Denis Leroux, pour le soutien technique qu'il m'a apporté, ainsi que le professeur Stéphane Campeau, membre de mon comité d'orientation.

Le soutien de ma famille et de mes amies, a été la clef du succès. Un merci particulier à ma formidable mère Sylvie, à mon conjoint William et à ma fille Clara, pour leur sourire et leur appui sans compromis au fil de ce long travail.

Il est aussi primordial de souligner la contribution de mes collègues puisque celles-ci ont participé à plusieurs discussions et m'ont amené à perfectionner mes techniques et méthodes de recherche.

Merci au Bassin Versant de la rivière Saint-Maurice et à sa directrice générale, Andrée Martin-Lambert, pour avoir participé à l'acquisition de différentes données. Je remercie également les riverains qui ont témoigné de leur expérience et qui ont fourni certaines informations essentielles concernant la dynamique de la rivière.

Merci au Fonds québécois pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) ainsi qu'à la Fondation du C.E.U. de l'Université du Québec à Trois-Rivières qui ont eu un rôle de premier plan à jouer dans mon cheminement universitaire puisque ceux-ci m'ont permis de me consacrer à ma maîtrise.

RÉSUMÉ

Durant la première moitié du 20^e siècle, de nombreux aménagements hydroélectriques ont été construits dans le bassin versant de la rivière Saint-Maurice et durant la seconde moitié, d'autres activités anthropiques (navigation de plaisance avec le démantèlement des estacades, urbanisation, etc.) s'y sont développées. L'objectif de cette étude était de déterminer les impacts de ces différentes activités anthropiques, en particulier les impacts induits par les nombreux barrages, sur l'évolution hydromorphologique de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle (43 000 km²).

Au niveau hydrologique, les débits maximums et moyens hivernaux journaliers de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle ont significativement augmenté dans le temps. Cette augmentation a été graduelle : elle a commencé dès la mise en service de la centrale et se poursuit maintenant. L'analyse des débits moyens et maximums printaniers de la rivière Saint-Maurice n'a révélé aucun changement significatif durant la période 1925 à 2006 malgré une augmentation de la fréquence de crues de récurrence supérieure ou égale à 2 ans durant la décennie 1970. En ce qui concerne le fleuve Saint-Laurent, les niveaux d'eau moyens en hiver ont significativement diminué entre 1913 et 2008. Cette diminution est survenue entre 1979-1980. Les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent ont aussi significativement diminué au printemps. La diminution des niveaux d'eau moyens printaniers est survenue entre 1955 et 1957 (diminution brusque).

En ce qui concerne l'évolution morphologique, la variabilité longitudinale de la largeur à plein bord en aval de la centrale de la Gabelle est caractérisée par deux changements significatifs de la moyenne. Le premier changement de type quasi abrupt est survenu en aval des Rapides des Forges et le second, de type progressif, en amont de la confluence de la rivière Saint-Maurice avec le fleuve Saint-Laurent avant la subdivision de la rivière Saint-Maurice en deux bras. La comparaison des photographies

aériennes prise en différentes périodes (1948, 1964, 1975, 1993 et 2008) n'a révélé aucun changement significatif de la moyenne de la largeur à plein bord dans le temps. Cependant, on a observé une augmentation significative de la superficie des îlots situés au niveau de la confluence en raison de l'accumulation des sédiments. Ceux-ci proviendraient probablement de l'érosion des berges localisées (ravinement en pente) dues à l'urbanisation du territoire. Le calcul de l'indice de qualité des bandes riveraines, nous a aussi démontré que les rives situées à proximité des zones urbaines ou à l'intérieures de ces zones, soit à l'embouchure du Saint-Maurice, ont un indice de qualité plus bas que les berges se trouvant plus éloignées de seulement quelques kilomètres.

Mots clés : Débits saisonniers, niveaux d'eau saisonniers, largeur à plein bord, îlots, barrages, indice de qualité des bandes riveraines, méthode de Lombard, ANOVA, Rivière Saint-Maurice, Fleuve Saint-Laurent.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
 CHAPITRE I	
CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	1
1.1 Contexte et problématique.....	1
1.2 Objectifs.....	3
 CHAPITRE II	
REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Processus d'érosion	5
2.2 Impacts des barrages hydroélectriques sur les rivières.....	6
2.2.1 Changements morphologiques en aval des barrages	6
2.2.1.1 La réponse du système fluvial	6
2.2.1.2 Changements dans la pente.....	7
2.2.1.3 Changements dans le profil transversal	7
2.2.1.4 Changements dans la forme en plan	8
2.2.1.5 Changements dans la forme du lit	8
2.2.2 Classification géomorphologique selon Brandt (2000)	8
2.2.3 Variabilité temporelle des changements	11
2.2.4 Variabilité spatiale des changements.....	12
2.2.4.1 Modification de la largeur du chenal	12
2.2.4.2 Modification du niveau de base du lit.....	13
2.2.5 Changements dans la charge en sédiments	13
2.2.6 Changements des processus fluviaux hivernaux	14
2.3 Impacts des activités anthropiques sur les rivières.....	15
2.3.1 Affectation du sol.....	15

2.3.1.1	Imperméabilisation et ruissellement.....	16
2.3.1.2	Aggravation des débits de pointe et inondations.....	16
2.3.1.3	Détérioration des bandes riveraines.....	17
2.3.2	Nautisme, batillage et démantèlement des estacades.....	19
2.3.3	Flottage et bois mort en rivières	20
2.3.4	Changements morphologiques du chenal associés aux activités anthropiques.....	21
CHAPITRE III		
MÉTHODOLOGIE		26
3.1	Présentation du cadre d'étude	26
3.1.1	Présentation du tronçon étudié.....	30
3.2	Traitement et analyse des données hydrologiques.....	31
3.2.1	Méthodes d'analyse de la variabilité interannuelle des débits et niveaux d'eau	32
3.2.2	Analyse de la succession des périodes hydroclimatiques	35
3.3	Estimation de l'évolution morphologique de la rivière	37
3.3.1	Traitement et analyse des photographies aériennes	38
3.3.1.1	Construction d'un modèle numérique d'élévation	38
3.3.1.2	Géoréférencement et orthorectification	39
3.3.2	Mesures de la largeur du chenal	40
3.3.2.1	Analyses statistiques de la largeur du chenal	41
3.3.2.2	Mesures de terrains complémentaires.....	43
3.3.3	Mesures de la superficie des îles.....	43
3.4	Analyse des impacts des activités anthropiques	44
3.4.1	Calcul de l'indice de qualité des bandes riveraines (IQBR).....	44
3.4.2	Analyse des effets du démantèlement des estacades	46
CHAPITRE IV		
RÉSULTATS.....		47
4.1	Analyse hydrologique.....	47
4.1.1	Rivière Saint-Maurice, Station La Gabelle.....	47
4.1.1.1	Variabilité interannuelle des débits	47

4.1.1.2	Succession des périodes hydroclimatiques des débits saisonniers de la rivière Saint-Maurice	50
4.1.2	Fleuve Saint-Laurent, Station Sorel.....	54
4.1.2.1	Variabilité interannuelle des niveaux d'eau	54
4.1.2.2	Succession des périodes hydroclimatiques des niveaux d'eau saisonniers du fleuve Saint-Laurent.....	56
4.1.3	Conclusion de l'analyse hydrologique saisonnière	58
4.2	Analyse morphologique.....	58
4.2.1	Variabilité longitudinale de la largeur du chenal.....	58
4.2.2	Variabilité temporelle de la largeur du chenal.....	61
4.2.3	Variabilité temporelle de la superficie des îles	65
4.3	Analyse des impacts des activités anthropiques	68
4.3.1	Indice de qualité des bandes riveraines (IQBR)	68
4.3.2	Effets du démantèlement des estacades	70
 CHAPITRE V		
DISCUSSION-CONCLUSION.....		72
5.1	Variabilité hydrologique de la rivière Saint-Maurice et du fleuve Saint-Laurent	73
5.1.1	Variabilité interannuelle des débits et niveaux d'eau en hiver	73
5.1.2	Variabilité interannuelle des débits et niveaux d'eau au printemps	76
5.2	Relation entre variabilité hydrologique et évolution morphologique de la rivière Saint-Maurice	77
5.3	Les impacts des activités anthropiques sur la morphologie locale de la rivière Saint-Maurice	82
5.4	Conclusion.....	85
 BIBLIOGRAPHIE.....		87
 ANNEXES.....		93

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Impacts des activités humaines sur les chenaux des rivières selon Strahler (1956) modifié par Vadnais (2011)	24
2.2 Impacts des activités humaines sur les chenaux des rivières selon Wolman (1967) modifié par Vadnais (2011).....	24
2.3 Impacts des activités humaines sur les chenaux des rivières selon Graf (1977) et Schumm (1979) modifié par Vadnais (2011).....	25
3.1 Bassin versant de la rivière Saint-Maurice et ses principaux équipements hydrauliques	29
3.2 Schéma de l'évaluation de la qualité de la bande riveraine (MDDEP)	45
4.1 Débits moyens printaniers – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle)	48
4.2 Débits maximums printaniers – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).	48
4.3 Débits moyens hivernaux – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle)	49
4.4 Débits maximums hivernaux – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).	49
4.5 Moyenne mobile simple calculée sur 10 ans – Débits moyens printaniers Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).....	52
4.6 Moyenne mobile simple calculée sur 10 ans – Débits moyens hivernaux Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).....	52
4.7 Analyse régionale d'estimation des crues – Débits maximums printaniers Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).....	53
4.8 Analyse régionale d'estimation des crues – Débits maximums hivernaux Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).....	53

4.9	Niveaux d'eau moyens printaniers – Fleuve Saint-Laurent (Sorel)	54
4.10	Niveaux d'eau moyens hivernaux – Fleuve Saint-Laurent (Sorel).....	55
4.11	Moyenne mobile simple calculée sur 10 ans – Niveaux d'eau moyens printaniers – Fleuve Saint-Laurent (Sorel)	57
4.12	Moyenne mobile simple calculée sur 10 ans – Niveaux d'eau moyens hivernaux – Fleuve Saint-Laurent (Sorel).....	57
4.13	Variabilité longitudinale de la largeur à plein bord du chenal de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle en 1964 (courbe noire) et en 2008 (courbe rouge)	59
4.14	Comparaison de la largeur à plein bord du chenal de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle par sections en 1964 (courbe noire) et en 2008 (courbe rouge)	60
4.15	Relation entre les années et l'évolution de la largeur – Section I (ANOVA) Rivière Saint-Maurice	63
4.16	Relation entre les années et l'évolution de la largeur – Section II (ANOVA) Rivière Saint-Maurice	64
4.17	Relation entre les années et l'évolution de la largeur – Section III (ANOVA) – Rivière Saint-Maurice.....	64
4.18	Variation de la superficie des trois îles de l'embouchure, de 1948 à 2008	67
4.19	Cartographie de la qualité des bandes riveraines (2008).....	69
4.20	Photographies aériennes des sites d'estacades étudiées (1993-2008) Rivière Saint-Maurice – Secteur Trois-Rivières/Cap-de-la-Madeleine.....	71
5.1	Niveaux d'eau moyens saisonniers du lac Ontario (en mètres) (Rouge : Printemps, Noir : Hiver)	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
3.1 Caractéristiques des principales centrales hydroélectriques de la rivière Saint-Maurice	28
3.2 Érosion active et sensibilité à l'érosion des rives de la rivière Saint-Maurice ..	31
3.3 Caractéristiques et localisation des stations hydrologiques.....	32
3.4 Les valeurs des paramètres de la loi régionale dans les trois régions hydrologiques homogènes	37
3.5 Caractéristiques et sources des photographies aériennes.....	39
4.1 Résultats du test de Lombard – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).	50
4.2 Nombre de récurrences de crue (2, 5, 10 et 50 ans) Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).....	51
4.3 Résultats du test de Lombard – Fleuve Saint-Laurent (Sorel).....	55
4.4 Localisation des distances de ruptures de la moyenne de la largeur à plein bord de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle en 1964 au moyen de la méthode de Lombard.....	61
4.5 Comparaison de la variabilité longitudinale des moyennes de la largeur à plein bord de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle en 1964. Résultats du test de Lombard.....	61
4.6 Résultats des ANOVA pour chacun des tronçons	62
4.7 Moyenne et écart-type (entre parenthèses) de la largeur à plein bord du chenal (en mètres) – Rivière Saint-Maurice	63
4.8 Variation de la superficie des îles (en m ²) et phase constatée (érosion/sédimentation) durant la période 1948 à 2008	66

CHAPITRE I

CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

1.1 Contexte et problématique

Depuis trois ans, plusieurs articles publiés dans les quotidiens régionaux rapportent régulièrement les plaintes des riverains de la rivière Saint-Maurice relatives à l'érosion des berges qui gruge inexorablement leurs terrains. C'est ainsi que dans son numéro du 22 juin 2006, *Le Nouvelliste* titrait à la Une : « L'érosion fait des vagues. Les berges de la rivière Saint-Maurice durement touchées ». Dans cet article, la journaliste Louise Plante rapportait qu'une résidente du boulevard des Chenaux avait constaté « que depuis 5 ans à peine, 20 pieds de terre ont pris le bord de la rivière ». D'autres faits similaires furent aussi rapportés ultérieurement.

Il devenait intéressant de vérifier dans les faits les affirmations des riverains à propos de l'érosion que subissait la rivière Saint-Maurice dans le secteur situé entre la centrale hydroélectrique de La Gabelle et la ville de Trois-Rivières. C'est ainsi que nous avons décidé de consacrer notre projet de maîtrise à l'analyse de ce phénomène d'érosion. Il convient cependant de noter que ce projet s'inscrivait dans un programme de recherche beaucoup plus vaste visant à quantifier les impacts des changements hydrologiques induits par les barrages sur l'évolution morphologique des chenaux au Québec. En ce qui concerne les impacts morphologiques des barrages, ce programme de recherche comprend deux axes majeurs :

- La comparaison des impacts morphologiques et sédimentologiques en fonction du mode de gestion des barrages.
- L'analyse de l'influence de complexe des barrages sur l'évolution morphologique des chenaux. Dans certains bassins versants comme celui de la rivière Saint-Maurice, de nombreux barrages ont été construits. Il est donc

intéressant d'analyser l'influence de ceux-ci sur l'évolution morphologique et hydrologique du tronçon inférieur. C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude du tronçon de la rivière Saint-Maurice situé entre la centrale de La Gabelle et sa confluence avec le fleuve Saint-Laurent.

Au Québec, plusieurs travaux ont déjà traité des impacts hydrologiques des barrages sur les rivières et principalement sur les réservoirs (Baxter et Glaude, 1980; Astrade, 1998; Assani et *al.*, 2002, 2004, 2005). Ceux-ci ont révélé que les impacts induits par ces ouvrages hydroélectriques sont diversifiés. En fonction de l'ampleur des changements hydrologiques observés, trois principaux types des régimes hydrologiques artificialisés furent identifiés (Assani et *al.*, 2005) : les régimes d'inversion, d'homogénéisation et de type naturel. Le premier régime est caractérisé par des débits maximums en hiver et par des débits minimums au printemps, au moment de la fonte de neige. Quant au second régime, il est caractérisé par une très faible variabilité des débits durant toute l'année. Enfin, le dernier régime est comparable à celui des rivières naturelles, mais il s'en distingue par une légère hausse des débits en hiver et par une légère baisse des débits au printemps.

Sur le plan morphologique, chaque type de régime hydrologique génère des impacts qui lui sont spécifiques. Au Québec, les travaux consacrés aux impacts morphologiques sont encore très rares. Hubert (2011), sous la direction du professeur Ali Assani, a analysé les impacts morphologiques induits par un régime de type inversion en aval du réservoir Taureau construit sur la rivière Matawin. De même, Alibert (2007) avait analysé les impacts du même régime sur l'évolution morphologique du chenal de la rivière Matawin en amont du réservoir. Cependant, aucune étude n'a encore été réalisée pour caractériser et modéliser les impacts morphologiques induits par un système de complexe de barrages. Dans le cas de ce type de système, l'évolution morphologique des chenaux résulte de l'interaction de ces trois types de régimes hydrologiques. Par conséquent, cette évolution peut être différente de celle induite par chacun des trois régimes. Elle peut devenir complexe lorsque d'autres facteurs que les barrages interviennent. Dans le tronçon de la rivière Saint-Maurice, situé entre la

centrale de La Gabelle et la confluence avec le fleuve Saint-Laurent, plusieurs facteurs peuvent influencer à divers degrés cette évolution morphologique. Il y a entre autres la variabilité hydrologique du fleuve Saint-Laurent, la qualité des bandes riveraines, le démantèlement des estacades, le nautisme et les effets du batillage, en plus de l'urbanisation grandissante du territoire.

Par ailleurs, en ce qui concerne la variabilité interannuelle des débits, Fortier et *al.* (2010) ont démontré que les changements qui affectent les débits lors de l'érection des barrages ne restent pas constants dans le temps. C'est ainsi que dans le cas de la rivière Matawin en aval du réservoir Taureau, ils ont observé depuis 1964 une hausse significative de la durée moyenne des crues hivernales. Ce type de changement hydrologique dans le temps peut ainsi accentuer le phénomène d'érosion en aval des barrages.

À la lumière de ces considérations, dans le cadre de ce projet, nous avons cherché à comprendre quels sont les facteurs pouvant expliquer le phénomène d'érosion des berges présentement actif sur la rivière Saint-Maurice dans le secteur situé entre La Gabelle et Trois-Rivières.

1.2 Objectifs

Notre travail a poursuivi les trois principaux objectifs suivants :

1. Analyser la variabilité hydrologique de la rivière Saint-Maurice et du fleuve Saint-Laurent. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : les débits hivernaux et printaniers de la rivière Saint-Maurice ont respectivement augmenté et diminué significativement dans le temps. Pour ce qui est du fleuve Saint-Laurent, les niveaux d'eau hivernaux et printaniers ont significativement diminué dans le temps.

2. Corréler la variabilité hydrologique avec l'évolution morphologique du chenal de la rivière Saint-Maurice. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : les berges de la rivière Saint-Maurice sont soumises à une érosion dont l'intensité s'est accrue dans le temps en raison, entre autres, de la variabilité hydrologique de la rivière.
3. Analyser les impacts des activités anthropiques sur l'évolution morphologique du chenal de la rivière Saint-Maurice. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : les activités anthropiques (démantèlement des estacades, dénaturalisation des berges, urbanisation du territoire, etc.) amplifient le phénomène d'érosion des berges présentement actif.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Processus d'érosion

Dans la littérature scientifique (Thorne, 1982; Lawler, 1993; Winterbottom et Gilvear, 2000), les processus d'érosion fluviale causant un changement dans la morphologie du cours d'eau sont bien documentés. Les principaux processus actifs dans le phénomène d'érosion des berges ont été définis par Thorne (1982) et se divisent en deux groupes : les processus fluviaux qui sont liés à l'écoulement de l'eau ainsi que les processus de météorisation qui sont liés aux conditions climatiques réduisant la cohésion et la stabilité des rives. Lorsque les processus de météorisation sont actifs, les processus fluviaux peuvent effectuer plus facilement leur travail en arrachant des particules de sol sur les berges du cours d'eau (Brien, 2006). De nombreuses études se sont intéressées aux processus en cause lors de l'érosion des berges (Thorne, 1982; Lawler, 1987; Saint-Laurent, 2002). D'après Lawler (1993), les processus en cause découleraient de la taille du cours d'eau affectée ainsi que de sa localisation dans le bassin versant (amont/aval). Les cours d'eau de taille moyenne situés dans la partie intermédiaire des bassins versants seraient ainsi affectés par l'écoulement de l'eau (processus fluviaux) qui provoquerait l'arrachement de particules. Les cours d'eau situés plus en amont du bassin versant seraient affectés par les processus liés à la météorisation. Notons que la portion aval des bassins serait affectée plus spécifiquement par les mouvements de masse.

Selon Winterbottom et Gilvear (2000), la stabilité des berges dépend en grande partie de la cohésion des matériaux formant celles-ci ainsi que de leur composition. Les berges constituées de matériel cohésif (argile), par exemple, subissent moins d'érosion que celles qui sont constituées entièrement de matériaux non-cohésifs (gravier) ou ayant une distribution égale de matériaux cohésifs et non-cohésifs (limon, sable et gravier). Le degré d'intensité des pentes ainsi que la hauteur spécifique des talus sont aussi des facteurs ayant un rôle primordial à considérer lors des études portant sur l'érosion des berges (Saint-Laurent, 2002).

2.2 Impacts des barrages hydroélectriques sur les rivières

Il existe une littérature relativement abondante sur les impacts morphologiques induits par les changements hydrologiques et sédimentologiques provoqués par les barrages dans le monde (Assani et *al.*, 2005; Brandt, 2000; Graf, 2006; Petts et Gurnell, 2005; Schmidt et Wilcock, 2008; Williams et Wolman, 1984). Au niveau de l'évolution morphologique des cours d'eau harnachés, plusieurs modèles décrivant les changements morphologiques furent aussi proposés. Certains auteurs ont même tenté de classifier les impacts géomorphologiques des barrages (Brandt, 2000; Petts et Gurnell, 2005; Williams et Wolman, 1984). Voici donc les principaux concepts qui ont été abordés dans ces études.

2.2.1 Changements morphologiques en aval des barrages

2.2.1.1 La réponse du système fluvial

Les chenaux alluviaux sont généralement considérés comme étant des systèmes en état d'équilibre où les changements qui surviennent peuvent causer des rétroactions négatives sur les processus naturels dans le chenal. Ces systèmes sont en mesure d'ajuster leur morphologie à long terme afin de retrouver leur état de quasi-stabilité (Richards, 1982). Selon Petts (1987), il est possible de regrouper les effets provoqués par l'insertion d'une nouvelle variable (barrages) dans les cours d'eau en trois ordres. Le premier ordre de changements se produit dans la charge en sédiments, les débits, la qualité de l'eau et le plancton qui décrivent toutes les entrées qui se produisent dans les rivières en aval des barrages et des réservoirs. Le second ordre de changements se traduit par la modification de la forme du chenal, la composition du substrat et la population de macrophyte. Le troisième ordre de changements s'effectue dans les populations de poissons et d'invertébrés. La modification des variables biotiques peut se produire avant la constatation des changements de second ordre (variable physique). Les ajustements morphologiques nécessaires à la stabilisation du chenal se poursuivront continuellement ainsi jusqu'à ce que le système fluvial ait retrouvé un nouvel état d'équilibre.

2.2.1.2 Changements dans la pente

Selon des études de Chien (1985), basées sur des observations de terrains et de laboratoires, le changement de pente induit par l'érosion est habituellement mineur. Par contre, si certaines modifications au niveau du lit de la rivière sont impossibles, l'adaptation de la pente sera importante afin de réduire la capacité de transport de sorte qu'elle corresponde à la charge en sédiments. L'équation d'équilibre de Lane (1955) peut nous aider à comprendre les effets d'un barrage sur les apports sédimentaires en aval : la pente du tronçon s'ajustera afin d'évacuer l'apport en sédiment avec le débit existant dans le but de revenir à un état d'équilibre qui évitera l'érosion (dégradation) ou l'accumulation (aggradation) excessive du lit. Les apports sédimentaires découlant de la présence d'un barrage diminueront ainsi obligatoirement suite à l'aplanissement de la pente du cours d'eau (incision du lit) afin de diminuer la capacité de transport de celui-ci et ainsi stabiliser le tronçon. Mentionnons que les impacts des changements de pente dans les cours d'eau peuvent être plus significatifs lorsqu'il y a d'autres modifications dans les caractéristiques physiques (longueur et sinuosité) de la rivière et lors de la rencontre du tributaire principal avec de plus petits affluents.

2.2.1.3 Changements dans le profil transversal

La forme du profil transversal peut être décrite par le rapport largeur/profondeur ($F=W/D$) lequel est influencé par la puissance du courant et le degré d'érosion des berges. La forme du profil transversal reflète ainsi la taille et la concentration des sédiments qui y sont transportés par un débit donné. Leopold et Maddock (1953) ont proposé une hypothèse voulant que les différences de largeur et profondeur du chenal soient liées directement au mode de transport et de déposition de sédiments. Dans un contexte de rivières régularisées, le déséquilibre causé dans le tronçon suite aux apports sédimentaires peut entraîner des changements significatifs du profil transversal. La largeur, la profondeur et le niveau de base du lit des rivières pourraient ainsi être modifiés (érosion / dégradation) dépendamment de la nature des matériaux qui les constituent ainsi que des conditions hydrauliques présentes.

2.2.1.4 Changements dans la forme en plan

La modification des cycles naturels hydrologique (débits) et sédimentologique (charge en sédiments) en aval d'un barrage peut induire la modification dans la configuration d'origine de la forme en plan du cours d'eau. Il a été démontré que la présence d'un ouvrage hydroélectrique peut modifier le fonctionnement du régime hydrologique de base (Assani et *al.*, 2005) et, ainsi, transformer la forme en plan (Brandt, 2000). Par ailleurs, il est important de considérer la taille des matériaux du lit lors de l'analyse de la forme en plan puisque les modèles varient aussi en fonction de cette variable. Schumm (1963) a d'ailleurs démontré qu'un pourcentage élevé de limons et d'argiles présents dans le périmètre du chenal peut avoir une incidence sur le ratio largeur/profondeur (bas). Cette action est susceptible de faire augmenter la sinuosité de la rivière et de rendre le chenal plus étroit et profond en raison de la charge de fond qui diminue.

2.2.1.5 Changements dans la forme du lit

Les changements dans la forme du lit peuvent être provoqués par la modification dans la taille des grains s'y retrouvant. Il semble que la forme du lit ainsi que les mouvements de la charge de fond soient liés à des débits survenant fréquemment par rapport à la capacité du chenal et à la morphologie des méandres lesquels reflètent plutôt les événements de nature extrême (Richards, 1982). Les rivières régularisées par des ouvrages hydroélectriques sont donc plus à risque de modifier la forme du lit puisque les capacités hydrauliques des cours d'eau sont différentes des caractéristiques naturelles de base.

2.2.2 Classification géomorphologique selon Brandt (2000)

La classification des impacts géomorphologiques en aval des barrages effectuée par Brandt (2000) découle de l'équation d'équilibre de Lane décrite précédemment. Dans la classification de Brandt (2000), l'approche de Lane (1955) a été explorée de

manière plus approfondie afin de tenir compte des effets de la construction des barrages sur le profil transversal (ratio largeur/profondeur) des systèmes alluviaux.

Les variables définissant les caractéristiques de chacun des cas dans la classification de Brandt sont représentées comme suit :

Q = Débits L = Charge en sédiments K = Capacité des débits

Premier cas : les débits diminuent ($\downarrow Q$)

- Si la charge en sédiments (L) est inférieure à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas de diminution du débit (Q) causé par les barrages, cela peut entraîner l'augmentation plus ou moins significative de la largeur et de la profondeur (dégradation du lit) (Cas 1 : $\downarrow Q$ et $L < K$). Par contre, il est également probable que la diminution du Q ne soit pas en mesure d'éroder ou de transporter le matériel présent avant la construction de barrages.
- Si la charge en sédiments (L) est égale à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas de diminution du débit (Q) causé par les barrages, cela peut entraîner la diminution du profil transversal du cours d'eau (\downarrow largeur/profondeur) (Cas 2 : $\downarrow Q$ et $L = K$). Cet événement est généralement accompagné par la création de terrasses et de nouvelles plaines d'inondations directement dans la section du chenal qui était auparavant sec.
- Si la charge en sédiments (L) est supérieure à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas de diminution du débit (Q) causé par les barrages, cela peut entraîner la diminution de la zone du profil transversal (largeur/profondeur) (Cas 3 : $\downarrow Q$ et $L > K$). Ce type de cas n'est pas fréquent mis à part si les sédiments transportés par la rivière sont en mesure de passer outre le barrage-réservoir.

Deuxième cas : les débits restent égaux ($= Q$)

- Si la charge en sédiments (L) est inférieure à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas où les débits restent inchangés (Q) consécutivement à la construction des barrages, cela peut entraîner l'augmentation de la zone couverte par le chenal (+ ou - largeur/profondeur) (Cas 4 : $= Q$ et $L < K$). L'ajustement du profil transversal du chenal comporte deux principaux mécanismes : (i) l'érosion par la dégradation du lit et (ii) l'élargissement du chenal.
- Si la charge en sédiments (L) est égale à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas où les débits restent inchangés (Q) consécutivement à la construction des barrages, les études ont conclu qu'aucun changement significatif n'a été observé dans ce type de cas (Cas 5 : $= Q$ et $L = K$).
- Si la charge en sédiments (L) est supérieure à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas où les débits restent inchangés (Q) consécutivement à la construction des barrages, cela peut entraîner la diminution de la zone couverte par le chenal (+ ou - largeur/profondeur) (Cas 6 : $= Q$ et $L > K$). L'ajustement du profil transversal s'effectuera par l'aggradation du lit avec des changements au niveau des formes du lit et de la forme en plan du chenal.

Troisième cas : les débits augmentent ($+ Q$)

- Si la charge en sédiments (L) est inférieure à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas où il y a augmentation du débit (Q) suite à la construction des barrages, cela peut entraîner une augmentation du profil transversal (ratio largeur/profondeur) (Cas 7 : $\uparrow Q$ et $L < K$). L'ajustement du profil transversal s'effectuera par la dégradation du lit et la disparition des terrasses.
- Si la charge en sédiments (L) est égale à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas où il y a augmentation des débits (Q) suite à la construction des barrages, cela peut entraîner une augmentation de la zone couverte par le chenal avec une

augmentation de la largeur ainsi que de la profondeur (Cas 8 : $\uparrow Q$ et $L = K$). L'ajustement du profil transversal s'effectuera avec des changements au niveau des formes du lit et de la forme en plan du chenal.

- Si la charge en sédiments (L) est supérieure à la capacité de l'écoulement (K) dans un cas où il y a augmentation des débits (Q) suite à la construction des barrages, cela peut entraîner une augmentation de la zone couverte par le chenal (Cas 9 : $\uparrow Q$ et $L > K$). L'ajustement du profil transversal s'effectuera par la disparition des terrasses, avec des changements au niveau des formes du lit (plat à antidunes) et de la forme en plan (méandre à rectiligne).

2.2.3 Variabilité temporelle des changements

Dès le commencement de la construction d'un barrage sur une rivière, les caractéristiques originales de l'écoulement et de la charge en sédiments commencent directement à se modifier. Selon Williams et Wolman (1984), l'accumulation de sédiments dans le réservoir, par exemple, débute avant la date de fermeture officielle et complète du barrage. Les effets constatés pendant la construction du barrage et après la fermeture de celui-ci peuvent être complètement opposés. Par exemple, Davey et *al.* (1987) ont noté que dans la rivière Thomson en Australie, pendant la construction du barrage, il y avait eu une augmentation du transport de sédiments en aval en plus d'une accumulation à proximité du site comparativement à une diminution après la fermeture de l'ouvrage.

Une étude menée par Williams et Wolman (1984) a démontré que la moitié des changements de largeur de chenal pourrait être survenue dans le premier ou le deuxième mois suivant la fermeture du barrage. Cette proportion ne représente que 5 % de la période totale sur laquelle la rivière est censée subir des changements induits lors de la construction d'un barrage. Par ailleurs, l'ajustement de la pente en aval de la nouvelle construction se fait relativement rapidement et la dégradation du lit diminue avec le

temps puisque celui-ci subit le pavage de son lit. La plupart des rivières atteignent plus de la moitié de l'ajustement total de leur profondeur en environ 7 ans.

2.2.4 Variabilité spatiale des changements

La distance du barrage avec la section étudiée influence directement le degré de changement que peut subir le chenal. Le débit relâché en aval de la centrale peut ainsi causer la dégradation ou l'aggradation du lit de la rivière. Dans un cas où le débit excède clairement la force critique de déplacement des sédiments, l'érosion verticale des berges dominera tandis que si les deux valeurs (débit vs force critique) atteignent un seuil similaire, c'est l'érosion latérale qui dominera. Plus loin en aval de la rivière, la force critique est habituellement beaucoup plus élevée que la puissance de l'écoulement ce qui conduit donc à la déposition de sédiments dans le chenal. (Williams et Wolman 1984). L'érosion latérale dominera par rapport à l'érosion verticale puisque la force de cisaillement (« shear stress ») aura diminué suite à l'augmentation de la distance entre la section du chenal en aval et le barrage en amont.

2.2.4.1 Modification de la largeur du chenal

Selon Williams et Wolman (1984), les résultats de la construction d'un barrage sur la largeur du chenal peuvent être de trois natures : élargissement, réduction ou aucun (constant). Généralement, les changements dans le profil transversal qui se sont produits suite à l'imposition d'un barrage sont documentés à l'aide de photographies aériennes, de cartes et de mesures de terrain. En 1957 Leopold et Wolman (tirée de Brandt, 2000) ont suggéré que le premier ajustement après les changements au niveau du débit est la modification dans la largeur du chenal qui englobe les contraintes de profondeur, de vitesse du courant, de pente ainsi que de rugosité. Il a été démontré que cette transformation n'est pas nécessairement attribuable à des changements dans les caractéristiques de l'écoulement, mais plutôt à la concentration de sédiments et à la composition du lit et des berges. D'après les résultats de Williams et Wolman (1984), la

variation spatiale de la largeur n'est pas significative puisqu'elle semble varier de façon aléatoire.

2.2.4.2 Modification du niveau de base du lit

La dégradation du chenal en aval des barrages est considérée comme étant le changement morphologique qui survient le plus rapidement dans le temps suite à la construction. Dans la plupart des cas, la dégradation du lit est causée par un manque d'apports sédimentaires provenant de l'amont de la rivière. Plusieurs études consultées par Brandt (2000) ont démontré que le maximum possible de dégradation s'effectue directement en aval du barrage ou à proximité de celui-ci. La stabilisation dans le phénomène de dégradation du lit du chenal peut survenir dépendamment de l'incidence de différentes variables indépendantes et dépendantes (Williams et Wolman, 1984). La stabilisation du tronçon peut se produire grâce à des variables indépendantes si, par exemple, la roche mère émerge, la pente est contrôlée par le niveau de base de la rivière ou la végétation fait son apparition dans le chenal. Les variables dépendantes qui sont en mesure de contrôler la stabilité du chenal concernent plutôt le pavage du lit (« armouring »), l'aplanissement de la pente suite à la diminution des débits ou à l'augmentation de la charge en sédiments transportés due à l'abaissement du niveau de base dans le chenal principal. Il est important de mentionner que si l'effet principal en aval du barrage est l'aggradation du chenal, la pente changera dans l'espace afin d'octroyer la puissance requise à l'écoulement pour transporter la charge en sédiments en surplus.

2.2.5 Changements dans la charge en sédiments

Les changements engendrés par la construction d'un barrage et/ou réservoir ne se limitent pas à influencer les caractéristiques de l'écoulement, mais influencent aussi le transport de sédiments dans le cours d'eau (Gregory, 2006). Tout dépendant de la taille du réservoir, une grande quantité de sédiments vont être stockés ne relâchant ainsi qu'une infime portion de ceux-ci en aval du barrage. La capacité de retenue (« trap

efficiency » entrant — sortant) des réservoirs a été étudiée par Williams et Wolman (1984). Ceux-ci ont trouvé que 99 % des sédiments sont retenus à l'intérieur des grands réservoirs par rapport à des valeurs qui sont généralement plus petites si on compare à des plus petits réservoirs. Certaines études ont démontré qu'il y avait une réduction significative de la charge en sédiments en aval de la rivière consécutivement à la construction de barrages hydroélectriques (Williams et Wolman, 1984; Brandt, 2000). Par ailleurs, la réduction de la charge en sédiments et de leur concentration en aval est accompagnée d'une diminution de la taille des particules qui ont tendance à être généralement des argiles, limons ou de petites particules (Brandt, 2000). La réduction d'une partie des sédiments transportés en aval d'un barrage peut ainsi entraîner des changements dans la morphologie du chenal.

2.2.6 Changements des processus fluviaux hivernaux

Les processus de formation de glace de rivière sont extrêmement complexes tant à l'échelle spatiale que temporelle. Les conditions hydrauliques et climatiques qui règnent dans les rivières contrôlent les étapes de formation de la glace par les échanges thermiques effectués entre l'eau et l'air. Les études concernant les processus fluviaux hivernaux se produisant en aval des barrages ne sont pas abondantes dans la littérature scientifique (Freysteinnsson, 1995; Zufelt, 1995). Par contre, quelques rapports ont été produits sur le sujet dans le cadre des études d'impacts d'avant-projet de la centrale sur la rivière Saint-Maurice (Guerrero, 1995; Hydro-Québec, 1996). Cette littérature scientifique nous a révélé que les effets des glaces sur la rivière se limitent principalement à l'impact des glaces flottantes qui viennent saper les pieds de berges (Saint-Laurent, 2002). Il a aussi été démontré que les barrages hydroélectriques peuvent entraîner un morcellement du couvert de glace en aval de l'ouvrage puisque le niveau d'eau dans la rivière à cette période se situe près de sa limite inférieure. Dans la section méridionale du bassin versant de la Saint-Maurice, la formation du couvert de glace est normalement complétée au mois de décembre (BVSM, 2007). Cependant, les conditions hydrauliques particulières de cette portion de la rivière à cause de la présence de centrales hydroélectriques, peuvent créer des zones libres de glace en aval. Les débits

restitués par les tributaires contribuent aussi à la formation de couverts de glace discontinus (GDG Environnement 1994). Les travaux sur les processus fluviaux hivernaux en aval des barrages ont finalement démontré que l'action du couvert de glace sur les berges peut entraîner de l'érosion le long des rives de la rivière si le couvert de glace est morcelé et se déplace suite à une tempête (vents) ou à des crues printanières (Guerrero, 1995; Saint-Laurent, 2002).

2.3 Impacts des activités anthropiques sur les rivières

Les activités anthropiques effectuées dans notre milieu peuvent modifier certaines composantes importantes du cycle de l'eau. Cela a été démontré dans plusieurs études (Bravard et Petit, 2000; MEO, 2003; Brierly et Fryirs, 2005; Giret, 2007). La modification de ce cycle est entre autres causée par les actions posées par l'homme, ceci ayant pour conséquence d'affecter la capacité d'infiltration et de stockage du sol en milieu urbain (Giret, 2007). Ces gestes ont des répercussions importantes sur la quantité d'eau de ruissellement (Bravard et Petit, 2000) et, ainsi, peuvent influencer la dynamique morphologique des cours d'eau urbains (MEO, 2003). L'urbanisation du territoire influence donc l'équilibre hydrologique et géomorphologique des cours d'eau (Gregory, 2006).

2.3.1 Affectation du sol

L'affectation du sol et l'usage qui en est fait par les hommes sont des facteurs qui ont un rôle considérable à jouer afin de quantifier les impacts de l'urbanisation sur les cours d'eau. Dès la fondation de la ville de Trois-Rivières au 17^e siècle, les berges de la rivière furent rapidement colonisées (Hardy et Séguin, 2004). Cette colonisation s'est poursuivie pour atteindre son paroxysme au siècle dernier avec l'industrialisation de la ville qui s'est alors étendue sur les versants (détérioration des berges naturelles), modifiant ainsi les conditions d'écoulements (imperméabilisation, ruissellement sur les versants et aggravation des débits de pointe).

2.3.1.1 Imperméabilisation et ruissellement

De manière générale, l'imperméabilisation du territoire urbain limite la recharge de la nappe, celle-ci ne peut donc plus soutenir les écoulements de base, en plus de réduire considérablement la capacité d'infiltration d'eau dans le sol (Brierly et Fryirs, 2005). Notons que l'imperméabilisation du sol suite à l'urbanisation et au déboisement intensif peut atteindre 50 % dans les secteurs résidentiels peu denses et jusqu'à 95 % dans les centres-villes (MDDEP, 2007). Citons en exemple, la ville de Koursk en Russie (Bravard et Petit, 2000) qui a vu sa capacité d'infiltration réduite de 100-120 mm par rapport à ce qu'elle représente dans la campagne située à proximité. Les changements liés à l'urbanisation du territoire peuvent ainsi avoir des conséquences sur le régime hydraulique des rivières, soit sur les épisodes de crues et d'étiages.

Mentionnons d'autre part que les impacts de l'urbanisation sont aussi visibles au niveau des précipitations au-dessus des agglomérations qui subissent un accroissement, pouvant même atteindre 10 à 15 % pour une grande ville telle que Moscou. Par contre, ce « bilan excédentaire est amputé par un accroissement de l'évaporation » (Bravard et Petit, 2000) qui est augmentée grâce à la surface évaporante étant plus grande de 5 à 20 %. De plus, le volume d'eau évaporable est plus faible à cause de l'augmentation du ruissellement qui représente 13 % de l'écoulement total limitant ainsi la recharge de la nappe phréatique de la région urbaine. Plusieurs travaux de recherche ont démontré que la présence de territoires urbanisés réduit considérablement les volumes d'infiltrations et d'évaporations contrairement au volume d'écoulement de surface qui augmentera suite à ce type de transformation du paysage naturel (Giret, 2007).

2.3.1.2 Aggravation des débits de pointe et inondations

Il existe d'autres conséquences en lien avec l'affectation du sol, l'imperméabilisation et le ruissellement, comme l'aggravation des débits de pointe ainsi que l'augmentation de la fréquence des inondations. L'aggravation des débits de pointe se traduit par un raccourcissement du temps de réponse entre la précipitation et l'écoulement dans le cours d'eau ainsi que par un rétrécissement de la durée de la phase

d'écoulement et une élévation du pic de crue. Le fait que la fréquence des précipitations en milieu urbain soit plus grande de 10 % est un facteur qui tend à aggraver les débits de pointe. Dans Bravard et Petit (2000), on peut lire que « le taux d'urbanisation affecte plus l'accroissement du débit de pointe des crues de faible récurrence que celui des crues de récurrence exceptionnelle ». L'accentuation du débit de pointe en milieu urbain est due à une quantité supérieure d'eau se déversant dans la rivière. Ceci affecte les caractéristiques hydrologiques du bassin versant touché.

Les inondations provoquées par les rivières peuvent découler des orages violents qui se déploient en zone urbaine et qui étalent une bonne quantité de précipitations pouvant ainsi causer des inondations estivales importantes. Le fait est que l'écoulement superficiel de la pluie est beaucoup plus important en milieu urbain et que les réseaux d'égouts pluviaux entraînent ces eaux immédiatement au cours d'eau à proximité. Habituellement, il est décrété, pour les milieux urbanisés, que le débit de pointe maximale des cours d'eau ne doit pas dépasser le débit observé durant une grande tempête, et ce, avant la construction des habitations riveraines (MEO, 2003). Cette mesure peut correspondre à une précipitation orageuse de récurrence de 2, 5, 10, 25 ou 100 ans, tout dépendant des caractéristiques climatiques de la région. Il existe quelques techniques afin de contrôler partiellement le ratio d'eau qui se rend à la rivière dans le but de limiter les inondations, par exemple, en emmagasinant temporairement les eaux ruisselantes.

2.3.1.3 Détérioration des bandes riveraines

La détérioration du couvert végétal riverain suite à l'industrialisation, l'urbanisation et l'expansion des terres agricoles a des effets néfastes sur la qualité des écosystèmes aquatiques et terrestres. La bande riveraine comporte généralement trois strates de végétation différentes (herbacée, arbustive et arborescente) composées d'espèces indigènes (St-Jacques, 1998; MDDEP, 2007). Ce complexe de végétation naturelle représente ainsi la transition entre les milieux (aquatiques et terrestres) et favorise le maintien de la biodiversité par ses multiples fonctions écologiques. La

dégradation de la qualité de l'habitat riverain résultant de l'expansion des activités humaines a des impacts sur la capacité des écosystèmes à supporter les changements. Selon la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* du MDDEP, la rive qui inclut la bande riveraine représente « tout à la fois un habitat pour la faune et la flore, un écran face au réchauffement excessif de l'eau, une barrière contre les apports en sédiments aux plans d'eau, un rempart contre l'érosion des sols et des rives, un régulateur du cycle hydrologique, un filtre contre la pollution de l'eau et un brise-vent naturel ». Celles-ci sont reconnues pour leurs multiples rôles, entre autres la stabilisation des berges et la protection de celles-ci contre l'érosion des sols. Le réseau racinaire des trois strates de végétations présentes agit comme agent antiérosif, en stabilisant la berge et en retenant le sol de manière plus cohésive (St-Jacques, 1998). De fait, le couvert végétal tend à prémunir les terres contre l'érosion causée par l'action du vent et du ruissellement. L'absence de bandes riveraines tend ainsi à entraîner l'érosion des sols. Le matériel non végétalisé qui se situe habituellement en pied de berge sous la limite des racines a tendance à s'éroder plus aisément provoquant des phénomènes de sapements, d'arrachements, de décrochements et d'éboulements (Brien, 2006). Selon Odgaard (1987), les berges munies d'arbres matures ont un risque deux fois plus faible de subir de l'érosion. Cela corrobore les résultats de plusieurs études démontrant l'efficacité de la végétalisation comme moyen de prévention de l'érosion (MDDEP, 2007; Hallot et al. 2005; Brien, 2006). De plus, il a été démontré dans certaines études que le déboisement des berges d'un cours d'eau peut entraîner une accélération des taux de migration et d'érosion (Micheli et Kirchner, 2004).

Soulignons que la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (MDDEP, 2007) suggère, pour une protection accrue, une bande végétale riveraine d'un minimum de dix ou quinze mètres de largeur selon les caractéristiques de la rive, soit la pente et la hauteur de talus. La largeur de la rive à protéger se mesure horizontalement à partir de la ligne des hautes eaux, c'est-à-dire à l'endroit où l'on passe d'une prédominance de plantes aquatiques à une prédominance de plantes terrestres.

2.3.2 Nautisme, batillage et démantèlement des estacades

Il existe peu de travaux sur les impacts des activités récréotouristiques, tel le nautisme, sur la morphologie des chenaux. Néanmoins, quelques études (Dauphin, 2000; Saint-Laurent, 2002; BVSM, 2007) ont illustré les impacts pouvant être causés par le batillage, soit le battement des vagues contre les rives produit par les remous des navires et embarcations, dans différents tronçons de cours d'eau. Notons l'étude de Dauphin (2000), qui a démontré que le passage des navires commerciaux dans certaines portions du fleuve Saint-Laurent peut être considéré comme un facteur important de contribution au processus d'érosion à cause du batillage généré. Le passage des embarcations motorisées peut provoquer un phénomène d'érosion des berges d'intensité différentes, selon la taille des bateaux, leur vitesse, la fréquence des passages ainsi que la distance des embarcations par rapport à la rive. Au niveau des cours d'eau de plus grande taille, il a été démontré que l'effet du batillage ne représente que peu d'impacts en comparaison avec le ruissellement (2 à 5 % de l'énergie produite sur les rives). Par contre, l'effet contraire se produit pour les petits cours d'eau où le batillage peut produire de 95 à 98 % de l'énergie (Hill et *al.*, 2002). Mentionnons que la hauteur de la vague est un des éléments à considérer dans l'étude de l'érosion des rives par le batillage. À titre d'exemple, le *Department of Natural Resources* du Minnesota a démontré que des vagues d'une hauteur de 12,5 cm ne causaient pas de dommages significatifs aux berges. De ce fait, la vitesse des embarcations de plaisance ou commerciale joue donc un rôle non négligeable puisque cette hauteur de vague est caractéristique d'une vitesse inférieure à 10km/h. Par contre, une hauteur de vague de 25 cm a un effet destructeur cinq fois plus important et une vague de 62,5 cm, près de 30 fois. D'après Saint-Laurent (2002), la rivière Saint-Maurice était auparavant moins susceptible de subir activement les processus d'érosion des berges puisque la présence des estacades de flottage de bois le long des rives protégeait celles-ci de l'effet du batillage. Cependant, le démantèlement récent des estacades (1997-1998) et l'augmentation récente des activités de plaisance risquent d'augmenter significativement la sensibilité des berges à l'érosion.

2.3.3 Flottage et bois mort en rivières

Les impacts du bois mort en rivière ont fait l'objet de nombreuses recherches (Le Hay et Piégay, 2007; Moulin et Piégay, 2004; Lassette et *al.*, 2008). Dans les zones à climat tempéré, le bois mort se trouvant en rivière est maintenant reconnu comme étant un élément clé dans le fonctionnement des systèmes fluviaux et de leurs communautés aquatiques. Dans la plupart des pays développés, le bois mort de rivière est enlevé systématiquement des cours d'eau puisque celui-ci peut obstruer le libre passage de la ressource hydrique. Citons en exemple les multiples tronçons de rivière qui étaient nettoyés régulièrement afin de prévenir les embâcles et de favoriser ainsi la navigation et le flottage du bois. Selon Le Hay et Piégay (2007), l'opération de nettoyage s'avérait utile pour « maintenir la stabilité des berges en favorisant les systèmes racinaires aux dépens des systèmes aériens ».

Au niveau des conséquences attribuables à la présence de bois en rivière, certaines études ont établi que les débris flottants présents peuvent faire augmenter significativement la fréquence et la durée des inondations en raison de l'existence de barrages de bois, en plus de perturber la navigation et causer des dommages aux structures en place (Diehl, 1997; Moulin et Piégay, 2004). Il a été démontré que les débris de bois présents dans les cours d'eau peuvent diversifier localement les formes fluviales, la vitesse de l'eau, la profondeur, le mode de sédimentation de la rivière ainsi qu'augmenter la complexité physique des écosystèmes aquatiques. De plus, il a déjà été prouvé que la présence de bois en rivière peut influencer grandement les conditions hydrauliques de l'écoulement de celle-ci, ce qui peut conduire à la modification de la forme originale du chenal (Le Hay et Piégay, 2007). Cette modification peut influencer ainsi les caractéristiques spatiales des phénomènes d'érosion et de déposition/sédimentation. Comme le mentionnent Moulin et Piégay (2004), dans les cours d'eau de plus grande taille, le chenal étant trop large pour être obstrué, les accumulations de bois s'effectuent sur les bords de celui-ci et peuvent affecter localement la forme du chenal. Les pièces de bois de grande taille contrôlent ainsi la géométrie du chenal notamment la largeur et la profondeur. Ils agissent aussi comme structures de rétention face aux sédiments et aux matériaux transportés en rivière. Dans

les chenaux de rivière dont la largeur dépasse 10 mètres, moins de 20 % des morceaux de bois sont associés à des accumulations sédimentaires. Dans un contexte de rivières régularisées, nous savons que la quantité de débris de bois est beaucoup plus petite et les événements relatés où il y a eu une élévation du niveau d'eau à cause d'un barrage de billot de bois dans le chenal sont plutôt rares (Shields et Smith, 1992). Généralement, les structures étant en mesure de stopper le déplacement du bois sont plus nombreuses en aval des centrales et la plupart de celles-ci se trouvent dans des zones de développement urbain. Les principaux obstacles au passage des billes de bois dans une rivière urbaine sont vraisemblablement les ponts (Diehl, 1997) puisque l'accumulation de bois à la base de ceux-ci peut causer une élévation du niveau d'eau en amont de la structure. Malgré tout, plusieurs études nous démontrent l'importance de la conservation des structures de bois en rivière, que ce soit au niveau écologique ou pour leurs implications au niveau des caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques spécifiques de la rivière (Gurnell et *al.*, 1997; Le Hay et Piégay, 2007; Moulin et Piégay, 2004; Lassetre et *al.*, 2008). Ces considérations nous amènent à conclure que le flottage du bois, qui a entraîné le nettoyage de plusieurs rivières québécoises, pourrait ainsi avoir modifié la dynamique morphologique et sédimentologique des cours d'eau, en plus d'avoir influencé l'avènement des activités récréotouristiques dans celles-ci.

2.3.4 Changements morphologiques du chenal associés aux activités anthropiques

Les nombreuses études concernant les changements morphologiques des chenaux de rivières situées en milieu urbain ont confirmé que leur dynamique naturelle allait être modifiée de façon significative (Gregory, 2006; Galster, 2008). Gregory (1992) a démontré que certains chenaux situés en milieu urbain pouvaient subir une augmentation de leur largeur et de leur profondeur moyenne suite à de l'anthropisation du territoire. Les changements dans la morphologie du chenal s'exécutent par la modification dans la taille du chenal, dans sa forme originale ou dans sa composition (Gregory, 2006). Plusieurs termes spécifiques sont maintenant associés à l'évolution morphologique des chenaux notamment « élargissement », « rétrécissement » et « métamorphose ». Certains phénomènes, tels que l'érosion des berges et du lit des cours d'eau, se sont accélérés à

cause des activités anthropiques. En milieu urbain, il y a un accroissement de ces forces érosives à cause du développement domiciliaire ayant pour conséquence d'accroître la quantité et la vitesse de l'écoulement dans les cours d'eau (MEO, 2003).

Dans son excellente étude sur les impacts des activités humaines sur les chenaux de rivières, Gregory (2006) a démontré que dans près de 72 % des cas de rivières urbaines étudiées, il y a une augmentation de la largeur et de la capacité du chenal. Il est évident que l'augmentation des débits découlant de l'urbanisation a un impact significatif sur la morphologie du chenal. La contribution des scientifiques par rapport à l'étude du rôle des activités humaines dans les changements morphologiques des chenaux de rivières peut se résumer à partir des travaux de cinq auteurs (Lane, 1955; Strahler, 1956; Wolman, 1967; Schumm, 1969; Graf, 1977).

Dans sa récente synthèse, Gregory (2006) a extrait les principaux résultats découlant de ces recherches. Voici un résumé :

- Lane (1955) a travaillé sur les types de changements dans le chenal avec son équation $Q_s D \approx Q_w S$ où Q_s représente la charge en sédiments, D le diamètre des particules, Q_w le débit et S la pente. La relation de LANE (1955) représente les facteurs qui affectent la dynamique d'un chenal et ainsi causent des déséquilibres. L'équation peut être utilisée pour indiquer les implications des types de changements pouvant survenir. Ce concept d'équilibre implique un ajustement mutuel entre les 4 facteurs contenus dans l'équation.
- La contribution de Strahler (1956) aux travaux sur l'évolution morphologique des rivières urbaines se limite au thème de l'extension des chenaux en aval par l'aggradation des chenaux fluviaux en amont des rivières. La figure 2.1 a été dessinée par Strahler (1956) afin d'expliquer son hypothèse de travail.
- Wolman (1967) a étudié le cycle d'érosion dans un contexte de chenal urbain. Il a pu représenter les changements dans la morphologie d'un chenal suite à une

modification d'affectation du sol allant de la forêt à l'agriculture et, enfin, en milieu urbain. Les changements que Wolman a quantifiés (condition du chenal, affectation du sol, charge en sédiments) sont représentés à la figure 2.2.

- Les études de Schumm (1969) concernent la métamorphose des rivières par les effets des changements dans la charge en sédiments et le transport par rapport à la morphologie des rivières. Les résultats de ces changements sur l'évolution morphologique des chenaux sont représentés par les caractéristiques suivantes : Q_s , Q_w , S , d_{50} , D , W , où (Q_s) représente les sédiments, (Q_w) le débit, (S) la pente, (d_{50}) le diamètre médian du matériel, (D) la profondeur et (W) la largeur de la rivière. ' .
- Les travaux de Graf (1977) se sont concentrés sur les changements produits lorsque le chenal passe d'un état d'équilibre à un autre par le biais d'un temps de réponse et d'un temps de réaction. Cet auteur a ainsi essayé de trouver les lois d'équilibre dans la dynamique d'un chenal (figure 2.3).

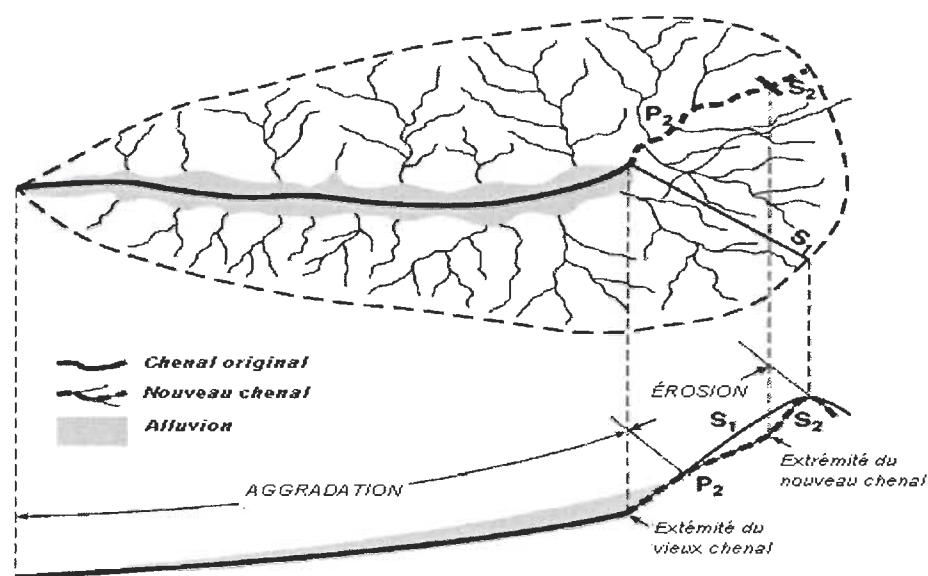


Figure 2.1 Impacts des activités humaines sur les chenaux des rivières selon Strahler (1956) modifié par Vadnais (2011).

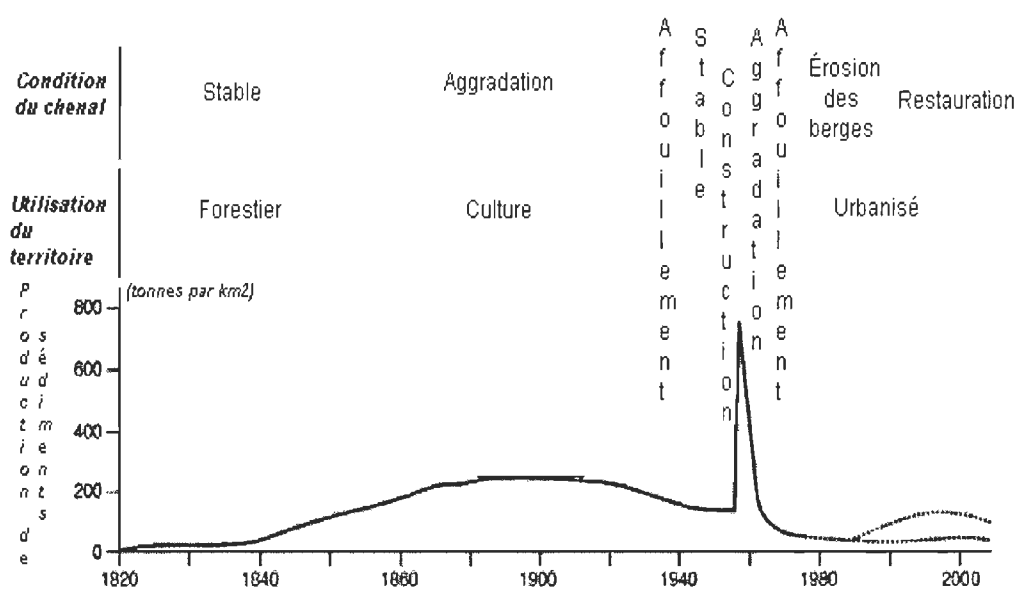


Figure 2.2 Impacts des activités humaines sur les chenaux des rivières selon Wolman (1967) modifié par Vadnais (2011).

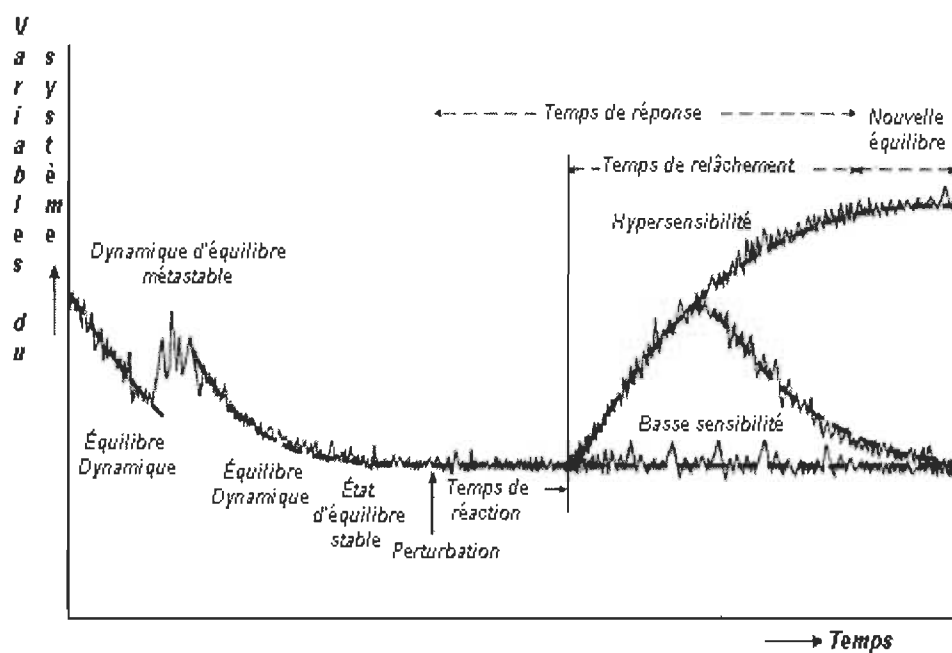


Figure 2.3 Impacts des activités humaines sur les chenaux des rivières selon Graf (1977) et Schumm (1979) modifié par Vadnais (2011).

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

3.1 Présentation du cadre d'étude

D'une superficie de 43 300 km² (Atlas du Canada), le bassin versant de la rivière Saint-Maurice est l'un des principaux affluents du fleuve Saint-Laurent en rive Nord. La Saint-Maurice compte 17 affluents en plus des 3200 lacs naturels et réservoirs qui sont présents dans le bassin versant. La plus grande partie du bassin versant, c'est-à-dire 70 % de celui-ci, se situe dans la région administrative de la Mauricie même s'il s'étend sur 4 autres régions (Abitibi-Témiscamingue, Lanaudière, Saguenay-Lac-Saint-Jean et la Capitale-Nationale).

Le passé géologique relativement complexe du bassin versant est encore perceptible aujourd'hui vu les multiples reliefs en place et la grande variété de dépôts de surface. Le bassin versant traverse deux régions géologiques d'importance, soit les Hautes Terres Laurentiennes du Bouclier Canadien (Nord) et les Basses Terres du Saint-Laurent (Sud). La portion du bassin située dans le Bouclier Canadien est caractérisée par un relief accidenté avec une altitude moyenne variant de 450 à 600 mètres. Les principaux matériaux en place sont des gneiss, paragneiss et des roches de types granitoïdes, très résistants aux différents processus érosifs. Les sables dominent presque à eux seuls les dépressions du paysage tandis que les tills d'origine glaciaire recouvrent certaines collines laissant de côté plusieurs sommets et plateaux. La section du bassin versant située dans les Basses Terres du Saint-Laurent débute à la hauteur de Grandes-Piles où le relief s'atténue tranquillement pour faire place à une grande plaine (maximum 150 mètres d'altitude). Les dépôts marins et fluviolacustres hérités du temps passé occupent abondamment le fond de la vallée du Saint-Maurice en progressant vers le fleuve. En effet, les argiles, silts et sables (sédiments fins) hérités des glaciations du Quaternaire sont omniprésents dans cette partie du bassin en plus de cohabiter avec de dépôts glaciaires épais de toutes sortes (moraines frontales, dépôts juxtaglaciaires et épandages fluvio-glaciaires à fine granulométrie). À proximité du fleuve Saint-Laurent,

les terrasses de l'embouchure de la rivière atteignent 80 mètres de dénivelé et terminent les 400 kilomètres de chemin que la rivière a parcourus (Robitaille et Saucier, 1998).

Le climat du bassin versant de la rivière Saint-Maurice est de type tempéré froid avec de grands écarts de température. Du sud au nord, la température enregistrée par les stations météorologiques diminue graduellement. La station de Shawinigan est la plus représentative du climat régnant à proximité du site d'étude, puisque celui-ci est localisé dans le cours inférieur de la rivière, sa température moyenne annuelle est de 4,6 °C. Pour ce qui est des précipitations moyennes annuelles, elles représentent environ 1011 mm par année pour la ville de Trois-Rivières. La température des eaux de surface du cours d'eau dépend en grande partie du régime climatique qui joue aussi un rôle prépondérant dans l'apparition des glaces sur la rivière durant la période hivernale. De manière générale, le couvert de glace fait son apparition sur la rivière vers la fin du mois de novembre, mais n'est pratiquement jamais continu puisque la présence de centrale hydroélectrique permet à certaines zones de demeurer libre de glace. Mentionnons qu'« en plus des facteurs thermiques, les conditions hydrauliques, soit les débits restitués des rivières, contribuent à la formation de couverts de glace discontinus » (GDG Environnement, 1994d).

Depuis le début du 20^e siècle, plus de 20 réservoirs et centrales ont été érigés sur son cours, ce qui fait de ce cours d'eau l'un des plus harnachés du Québec méridional (Hydro-Québec, 2007) (figure 3.1). La présence de nombreux seuils et l'encaissement particulier du lit de la rivière à certains endroits en font un lieu de prédilection pour l'exploitation de ses ressources hydroélectriques à long terme (BVSM, 2007). Depuis les années 1900, le potentiel hydroélectrique de la rivière ainsi que les différentes utilisations (manufacturière, drave, transport) de celle-ci ont été exploités par plusieurs compagnies afin de combler certains besoins. Dans le tableau 3.1, nous pouvons distinguer les renseignements généraux concernant les principales centrales hydroélectriques ayant été construites sur la rivière Saint-Maurice depuis un siècle. La plupart des centrales construites ont été mises en service dans la première portion du 20^e siècle et fournissent actuellement 5 % de la puissance installée au Québec. La rivière

Saint-Maurice étant l'une des plus harnachées, la modification de son cycle hydrologique naturel est tout à fait normale. Effectivement, les débits du cours d'eau sont régularisés par les 9 ouvrages hydroélectriques principaux se trouvant sur son chenal. La régularisation des débits de la rivière est accomplie en fonction de la demande des utilisateurs d'électricité au Québec. En période hivernale, la demande des utilisateurs augmente à certains moments de la journée ce qui fait augmenter le débit relâché dans la rivière. Le réservoir principal (Gouin) situé en tête de bassin sert à emmagasiner la ressource hydrique afin d'être en mesure de combler les apports naturels d'eau qui sont trop faibles en hiver. Le réservoir contribue donc à régulariser l'ensemble du système hydrique de la rivière Saint-Maurice (débit et niveau). Selon le *Plan directeur de l'eau du Bassin versant de la rivière Saint-Maurice* « la régularisation d'un système hydrique a plusieurs avantages sur le plan de la sécurité civile : elle permet de limiter les crues et les étiages et, ainsi, éviter inondations ou assèchements trop sévères ».

Tableau 3.1

Caractéristiques des principales centrales hydroélectriques de la rivière Saint-Maurice

Centrale (du nord au sud)	Mise en service	Hauteur de chute	Type	Superficie du réservoir (km ²)	Puissance installée
<i>Rapide Blanc</i>	1934	32.92	Réservoir	82	201.6 MW
<i>Trenche</i>	1950	48.47	Fil de l'eau	14	302.4 MW
<i>Beaumont</i>	1958	37.80	Fil de l'eau	5	243.0 MW
<i>La Tuque</i>	1940	34.75	Fil de l'eau	8	219.6 MW
<i>Grand-Mère</i>	1916	25.61	Fil de l'eau	22	149.6 MW
<i>Shawinigan-2</i>	1911	44.20	Fil de l'eau	5	202.6 MW
<i>Shawinigan-3</i>	1948	44.20	Fil de l'eau	5	183.6 MW
<i>La Gabelle</i>	1924	17.38	Fil de l'eau	3	136.6 MW

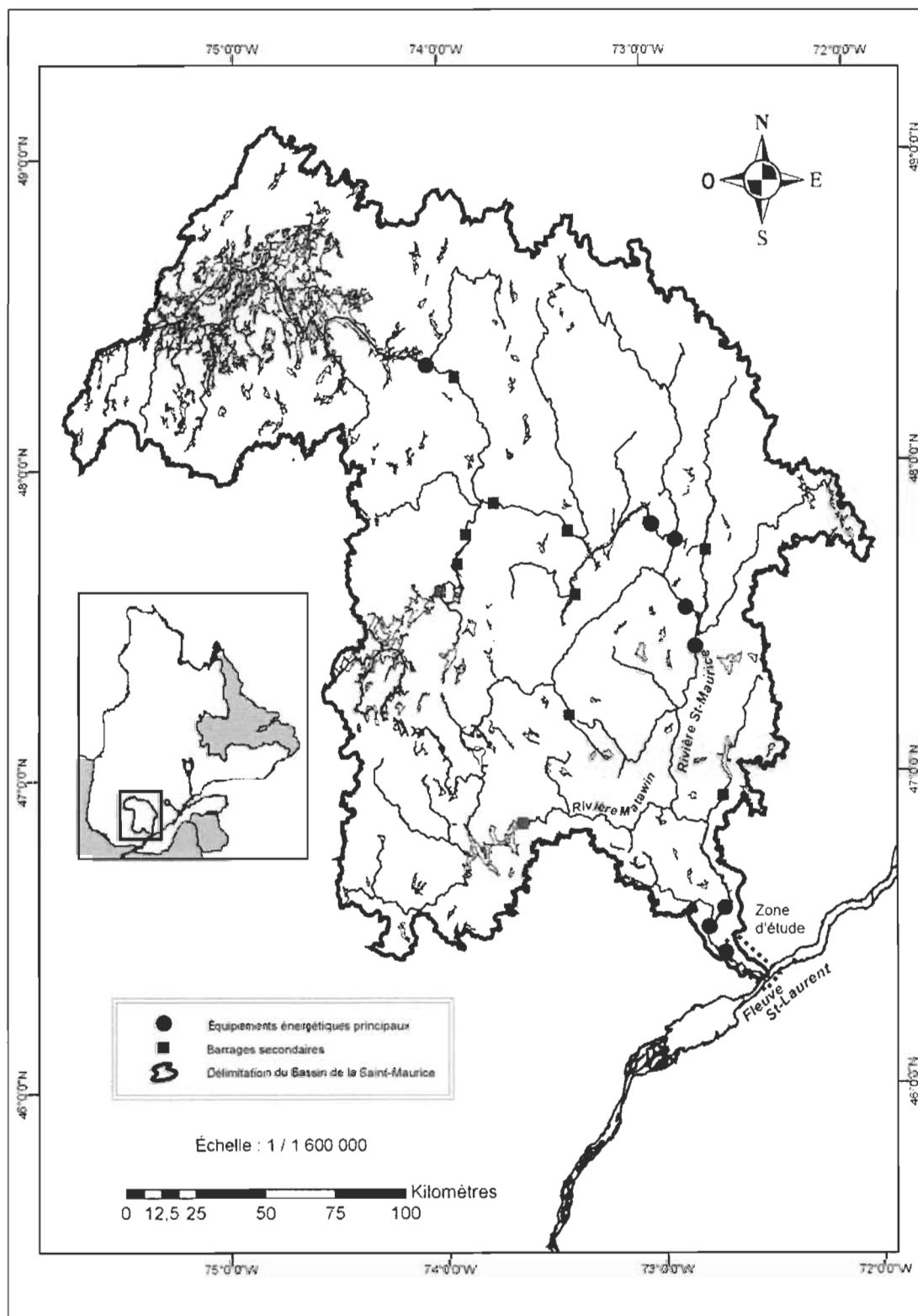


Figure 3.1 Bassin versant de la rivière Saint-Maurice et ses principaux équipements hydrauliques.

3.1.1 Présentation du tronçon étudié

Le tronçon de la rivière Saint-Maurice étudié dans cette recherche se situe entre la centrale hydroélectrique La Gabelle et le fleuve Saint-Laurent (annexe A). D'une longueur totale de 25 kilomètres, cette portion de la rivière est actuellement soumise à une érosion intense qui menace certaines habitations riveraines dans l'agglomération de Trois-Rivières (BVSM, 2007). De plus, l'érosion présentement constatée est susceptible de provoquer des conflits d'usage parmi les utilisateurs de la rivière (les riverains, les plaisanciers, les transporteurs, etc.). Il est important de mentionner que la portion de cours d'eau que nous étudions est située complètement en aval du bassin versant dans la partie la plus urbanisée (Trois-Rivières). Cette section de la rivière située dans les Basses Terres du Saint-Laurent est plus susceptible de subir énergiquement les impacts des processus érosifs par rapport à la portion amont de la Saint-Maurice (Bouclier Canadien), vu la sensibilité accrue des éléments constituant les berges.

La problématique d'érosion des berges du Saint-Maurice est un phénomène relativement récent ayant été examiné récemment par le Groupe HBA (1998) (tableau 3.2 et annexe A). Les berges de cette portion de la rivière Saint-Maurice étant dominées largement par des argiles (50 à 75 %) surmontées de sables, celles-ci sont plus sensibles à l'érosion de tous types. De plus, l'effet conjugué de la hauteur des talus (> 50 m.) ainsi que des fortes pentes (< 25°) augmente considérablement la sensibilité déjà élevée de ce tronçon à l'érosion. Présentement, nous avons pu noter la présence de glissements, d'effondrements et de ravinements en rive est du cours d'eau. L'érosion des berges de la rivière est en fait un processus de dégradation ou de transformation des rives causé par l'action d'un ou de plusieurs agents externes.

Il est important de mentionner que depuis l'arrêt des activités de flottage de bois en 1992 et le démantèlement des estacades par la suite, les activités nautiques de tout genre sont à nouveau accessibles pour les usagers du cours d'eau (BVSM, 2007). Les activités de nautisme dans la portion La Gabelle-Trois-Rivières sont limitées de manière naturelle par un obstacle de taille : les rapides des Forges. Celles-ci couvrent une distance d'environ 5,5 km et ont une faible profondeur lors de moment d'hydraulicité

moins grande : elles sont presque impossibles à franchir. Malgré cette contrainte, ce tronçon de rivière est de plus en plus utilisé pour les activités nautiques, particulièrement aux abords de Trois-Rivières, en plus de subir une pression beaucoup plus grande provenant du milieu humain l'entourant.

Tableau 3.2

Érosion active et sensibilité à l'érosion des rives de la rivière Saint-Maurice

Tronçon	Longueur totale (km)	Rive en érosion active	Sensibilité à l'érosion (km)		
			Forte	Moyenn	Faible
<i>Barrage Gouin – Amont du réservoir Blanc</i>	271.1	20.8 (7.7 %)	113 (41.7 %)	36.3 (13.4 %)	32.7 (12.1 %)
<i>Amont du réservoir Blanc – Centrale de La Tuque</i>	423.1	28.4 (6.7 %)	59.2 (14 %)	86.5 (20.4 %)	37.3 (8.8 %)
<i>Centrale de La Tuque – Rapide Manigance</i>	173.4	9.5 (5.5 %)	68.8 (39.7 %)	33 (1.9 %)	22.6 (13 %)
<i>Rapide Manigance – Centrale de Grand-Mère</i>	115.2	18.0 (15.6 %)	45.8 (39.8 %)	7.8 (6.8 %)	6 (5.2 %)
<i>Centrale de Grand-Mère – Centrale La Gabelle</i>	70.7	3.8 (5.4 %)	26.7 (37.8 %)	5.9 (8.3 %)	12.4 (17.5 %)
<i>Centrale La Gabelle – Trois-Rivières</i>	57.4	12.8 (22.3 %)	32.3 (56.3 %)	7.35 (12.8 %)	9.2 (16 %)

3.2 Traitement et analyse des données hydrologiques

La variabilité interannuelle des débits de rivières lâchés en aval de la centrale de La Gabelle sur la rivière Saint-Maurice et les niveaux d'eau mesurés à la station Sorel sur le fleuve Saint-Laurent ont été analysés pendant la période 1925 à 2008 (La Gabelle) et 1913 à 2007 (Fleuve) (tableau 3.3). Nous avons analysé deux séries distinctes : les débits moyens et maximums journaliers hivernaux et printaniers. Les données de débits que nous avons utilisées dans cette recherche proviennent d'Environnement Canada (Water Survey of Canada, HYDAT : <http://www.wsc.ec.gc.ca>, consulté en ligne octobre 2008) et d'Hydro-Québec. Il est important de mentionner que nous avons procédé à l'analyse de la variable « débits » puisque celle-ci intègre mieux toutes les conditions climatiques présentes dans le bassin versant par rapport aux données de températures et

de précipitations. Cette étape de la recherche nous a renseigné sur les impacts des barrages (complexe) sur la Saint-Maurice et sa morphologie puisque les débits de cette rivière sont régularisés.

Tableau 3.3

Caractéristiques et localisation des stations hydrologiques

Nom Station	<i>Saint-Laurent (Fleuve) À Sorel</i>	<i>Saint-Maurice (Rivière) À la Centrale de la Gabelle</i>
No. Station	02OJ022	02NG005
Latitude	46°2'49'' N	46°26'58'' N
Longitude	73°6'58'' O	72°44'24'' O
Paramètres hydrométriques	Niveau d'eau	Débit
Superficie du bassin versant	-	42 700 km ²
Période d'exploitation	1912-2007	1924-2008
Régime hydraulique	Régularisé	Régularisé
Horaire d'exploitation	Continue	Continue
Type de jauge	Enregistreurs	Centrale hydroélectrique

Pour être en mesure d'effectuer la comparaison de la variabilité interannuelle saisonnière, les valeurs des débits ont été standardisées avant d'y appliquer les tests statistiques.

3.2.1 Méthodes d'analyse de la variabilité internannuelle des débits et niveaux d'eau

Régression linéaire

Cette méthode statistique nous a permis de vérifier la nature de l'évolution de chacune des séries hydrologiques constituées dans le temps, et ce, pour la totalité de la période d'étude. Grâce à ce procédé, nous avons vérifié s'il existait des tendances significatives (augmentation ou diminution) au niveau de la variabilité hydrologique des données de débits et niveaux d'eau. Cet outil a l'avantage de représenter graphiquement les tendances, ce qui facilite l'interprétation et l'analyse des résultats.

Cette méthode est largement utilisée dans la littérature scientifique pour tester la stationnarité des variables hydroclimatiques (Kundzewicz et *al.*, 2005). Elle consiste à relier les débits (variable dépendante) au temps ou années (variable indépendante) selon l'ordre chronologique de leurs mesures. Pour tester la significativité de la droite de régression, on applique la formule suivante :

$$F_o = \frac{R^2(n-2)}{(1-R^2)} \quad (1)$$

F_o est le score du test calculé; R^2 est le coefficient de détermination et n est la taille de l'échantillon analysé. Lorsque la valeur de F_o est supérieure à la valeur critique (F_c) lue dans la table de Fisher-Snedecor pour les degrés de ($1, n-2$), on rejette l'hypothèse nulle (absence de hausse ou de baisse des débits en fonction du temps) à un seuil de probabilité donné.

Toutefois, cette méthode, bien qu'elle soit largement utilisée, présente plusieurs faiblesses majeures :

- Elle est sensible à l'autocorrélation.
- Elle ne permet pas de déterminer de manière exacte la date de changement de la moyenne ou de la variance d'une série hydrologique.
- Elle ne permet de détecter que des changements de type brusque. Ainsi, en cas de changement progressif de la moyenne ou de la variance, ce changement ne peut être détecté par la régression simple.

Pour pallier ces faiblesses, nous avons appliqué la méthode de Lombard.

Méthode de Lombard

Cette méthode développée récemment par Quessy et *al.* (2011) a été utilisée dans le cadre de notre projet afin d'analyser l'influence des affluents régularisés sur la

tendance à long terme de la variabilité temporelle des débits. Le test de Lombard nous a permis de déterminer la nature (changement brusque ou progressif) et la date du changement qui affecte la moyenne et la variance des séries hydrologiques que nous étudions. Voici l'explication plus précise de cette méthode :

Supposons une série d'observations, dénotées X_1, \dots, X_n , où X_i est l'observation au temps $T=i$. Ces valeurs sont supposées indépendantes. Une question intéressante consiste à vérifier si la moyenne de cette série a changé. Si μ_i est la moyenne théorique de X_i , alors un scénario possible est donné par l'équation générale de Lombard, c'est-à-dire :

$$\mu_i = \begin{cases} \theta_1, & \text{if } 1 \leq i \leq T_1; \\ \theta_1 + \frac{(i - T_1)(\theta_2 - \theta_1)}{T_2 - T_1}, & \text{if } T_1 < i \leq T_2; \\ \theta_2, & \text{if } T_2 < i \leq n. \end{cases} \quad (2)$$

Ainsi, la moyenne passe graduellement de θ_1 à θ_2 entre les temps T_1 et T_2 . Un cas particulier est la rupture abrupte, lorsque $T_2 = T_1 + 1$.

Pour tester formellement si la moyenne d'une série est stable ou suit le modèle (1), on peut utiliser la procédure statistique de Lombard (1987). À cette fin, soit R_i , le rang de X_i parmi X_1, \dots, X_n . Prenons la fonction score de Wilcoxon, c'est-à-dire $\phi(u) = 2u - 1$, et définissons le score de X_i par

$$Z_i = \frac{1}{\sigma_\phi} \left\{ \phi \left(\frac{R_i}{n+1} \right) - \bar{\phi} \right\}, \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad (3)$$

Où

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi \left(\frac{i}{n+1} \right) \quad \text{et} \quad \sigma_\phi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \phi \left(\frac{i}{n+1} \right) - \bar{\phi} \right\}^2 \quad (4)$$

La statistique de test de Lombard est

$$S_n = \frac{1}{n^5} \sum_{T_1=1}^{n-1} \sum_{T_2=T_1+1}^n L_{T_1 T_2}^2, \quad (5)$$

Où

$$L_{T_1 T_2} = \sum_{j=T_1+1}^{T_2} \sum_{i=1}^j Z_i \quad (6)$$

Au seuil de probabilité de 5 % $S_n > 0.0403$, on conclut que la moyenne de la série a changé de façon significative selon un modèle de la forme (2). À noter que le test est adéquat pour détecter tous les types de changements induits par le modèle (2), incluant les changements abrupts. Une étude complète sur la puissance et la robustesse de S_n et de cinq autres statistiques de test a été effectuée par Quessy et *al.* (2011).

3.2.2 Analyse de la succession des périodes hydroclimatiques

Moyenne mobile

Les séries hydrologiques de la rivière Saint-Maurice et du fleuve Saint-Laurent ont été analysées au moyen de la technique des moyennes mobiles simples. L'évolution morphologique des chenaux est influencée par la succession des périodes humides (pluvieuses) et sèches. Pour déterminer ces périodes, nous avons appliqué la méthode de lissage sur une période de 10 ans (moyenne mobile simple) afin de pouvoir éliminer les variations annuelles. Nous avons choisi cette échelle du fait que les photographies aériennes sélectionnées ont été prises approximativement tous les dix ans.

Analyse régionale

En géomorphologie, il est généralement admis que les changements morphologiques les plus importants survenus au cours d'une année donnée soient associés au débit le plus élevé mesuré cette année. Il devient donc important de déterminer si l'intensité (magnitude des crues) et la fréquence ont significativement

changé dans le temps. Étant donné que les débits de la rivière Saint-Maurice sont régularisés, il devient difficile d'estimer en conditions naturelles la récurrence de crues par une loi de probabilité ajustée sur la série de débits mesurés en aval de la centrale La Gabelle en raison de l'influence des réservoirs et des centrales situés en amont sur la magnitude et la fréquence de crues. Par conséquent, nous avons recouru à la méthode de l'analyse hydrologique régionale pour estimer les débits correspondant aux crues de récurrence de 2, 5, 10 et 50 ans en hiver et au printemps en condition naturelle (sans tenir compte de l'influence des réservoirs et des centrales hydroélectriques). Cette méthode a été développée par Antil et *al.* (1998) pour le Québec.

Voici les étapes de cette analyse :

La première étape consiste à estimer la moyenne des débits maximums annuels à partir de la superficie du bassin versant au moyen de la relation suivante :

$$Q_m = 1.61S^{0.70} \quad (7)$$

Q_m est la moyenne des débits maximums annuels et S est la superficie du bassin versant du site.

La seconde étape consiste à calculer le débit normalisé régional (Q_T) au moyen de l'équation suivante :

$$Q_T = \beta + \alpha \cdot \{1 - [-\ln B]^\kappa\} \quad (8)$$

Q_T est le quantile normalisé régional, κ est le paramètre de forme de la loi GEV (*General Extreme Value*) régionalisée, α est le paramètre de localisation de la loi GEV régionalisée et, enfin, β est le paramètre d'échelle de la loi régionalisée. Les valeurs de ces trois paramètres de la loi régionale ont été tabulées par Antil et *al.* (1998) pour les trois régions hydrologiques homogènes définies par les trois auteurs au Québec (tableau 3.4). Quant à B , sa valeur est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$B = [(T - 1)/T] \quad (9)$$

T est la période de retour correspondant à un quantile donné.

La dernière étape consiste à estimer la valeur du débit correspondant à la période de récurrence T au moyen de la relation suivante :

$$Q_e = Q_T \cdot Q_m \quad (10)$$

Tableau 3.4

Les valeurs des paramètres de la loi régionale dans les trois régions hydrologiques homogènes

Région hydrologique			
homogène	β	α	κ
I	0.8397	0.2819	0.0086
II	0.8659	0.2754	0.0993
III	0.8910	0.2308	0.1173

3.3 Estimation de l'évolution morphologique de la rivière

L'évolution morphologique de la rivière Saint-Maurice a été analysée au moyen d'une analyse diachronique des photographies aériennes prises au cours de 6 décennies différentes (1948, 1964, 1975, 1985, 1993 et 2008). Cette analyse diachronique est fondée sur la comparaison des tracés de largeur de chenal et des mesures de superficie des îles de l'embouchure obtenus grâce aux photographies aériennes, qui sont les principales sources d'informations lors de l'étude de l'évolution morphologique d'un cours d'eau (Lawler, 1993; Gurnell, 1997; Winterbottom et Gilvear, 2000; Kondolf et

Piégay, 2003; Hughes et *al.*, 2006; Brien, 2006; Galster et *al.*, 2008). Les photographies aériennes offrent plusieurs avantages comme une précision accrue dans l'observation de certains types de phénomènes qui nous intéressaient particulièrement dans le cadre de ce projet, tels que l'érosion et le développement des activités anthropiques sur les berges du cours d'eau. L'utilisation des photographies aériennes dans le cadre d'une étude sur les changements morphologiques d'un cours d'eau est possible seulement si les changements perceptibles excèdent les erreurs spatiales intrinsèques aux sources et aux traitements (Alibert, 2007). Il est donc primordial de traiter et manipuler les données sources (photographies aériennes, couches vectorielles, modèle numérique d'élévation) de façon à limiter les erreurs et ainsi optimiser les résultats.

3.3.1 Traitement et analyse des photographies aériennes

Voici les étapes que nous avons suivies afin d'effectuer le traitement et l'analyse des photographies aériennes.

3.3.1.1 Construction d'un modèle numérique d'élévation

L'élaboration d'un modèle numérique d'élévation a été la première étape afin d'être en mesure d'effectuer le géoréférencement et l'orthorectification des photographies aériennes sélectionnées. Les « MNE » (modèles numériques d'élévation) sont une représentation du relief qui estime l'altitude d'un point à partir de courbes de niveau (Base de données topographique du Québec 1 : 20 000). Nous avons utilisé une technique nommée « Réseaux de triangles irréguliers (TIN) » qui est une méthode de représentation du terrain basée sur la décomposition de la surface en triangles formant des facettes s'adaptant au relief. Une validation de ce modèle d'interpolation a été essentielle afin s'assurer qu'il soit une représentation du paysage le plus exact possible. La validation croisée de celui-ci a été effectuée à partir d'un fichier de points (training / test), les valeurs obtenues avec le TIN ont été comparées aux valeurs réelles du fichier test. Cette homologation a été menée à partir des paramètres de validation tels que la moyenne et l'écart type (erreur maximum de +/- 3 mètres dans 99,7 % des cas).

3.3.1.2 Géoréférencement et orthorectification

Les clichés sélectionnés dans le cadre de ce projet couvrent la période allant de 1948 à 2008. Les clichés de 1948 et de 2008 nous sont parvenus en version numérique, pour les autres clichés, ils étaient en version papier et ont été numérisés à une résolution de 600 points par pouce (*dot per inch*, dpi) sous le format TIFF (8 bits). L'échelle des photographies est au 1 : 15 000 pour les années 1948, 1975, 1985, 1993 et 1996. Les clichés datant de 1964 sont à l'échelle 1 : 15 840 et la mosaïque de 2008 a une résolution de 30 cm au sol. La majorité des clichés ont été pris en noir et blanc, exception faite de l'année 1996 (infrarouge) et de 2008 (couleur). Les sources des données utilisées et les caractéristiques de chaque série de photographies aériennes utilisées se retrouvent dans le tableau 3.5. Notons que dans ce tableau le débit journalier a été associé à la date de prise du cliché afin de prendre en compte la variabilité hydrologique de la rivière lors de l'analyse des résultats de l'évolution morphologique du chenal et des îles.

Tableau 3.5
Caractéristiques et sources des photographies aériennes

Sources	Séries des photos	Date	Débit journalier (m ³ /s)	Échelle
Photothèque Nationale de l'air du Canada	A11359			
	A11361	13-mai-48	1280	1 : 15 000
	Q64542			
	Q64543			
	Q64544	07-sept-64	343	1 : 15 840
Photocartothèque québécoise	Q75350			
	Q75894			
	Q75899	05-sept-75	422	1 : 15 000
	Q85836			
	Q85841			
	Q85844	28-mai-85	495	1 : 15 000
	HMQ93100	28-avril-93	1020	1 : 15 000
	Q96407	14-août-96	447	1 : 15 000
	Mosaïques			
	31107-200-0202			
	31107-200-0102	04-juil-08	1420	30 cm

Année 1996 : Utilisée uniquement dans le cadre des mesures de la superficie des îles.

Le géoréférencement et l'orthorectification des séries de photographies aériennes ont été effectués à partir du logiciel PCI GEOMATICA (Geomatica, Orthoengine, V 10.0). Le géoréférencement d'une image fait correspondre à chaque pixel de cette dernière un couple de coordonnées géographiques (HUGHES et *al.* 2006). L'orthorectification, pour sa part, est un traitement qui permet la correction géométrique des distorsions spatiales causées par l'inclinaison du capteur et/ou le relief du terrain (irrégularités topographiques du territoire) (Alibert, 2007). Cette correction est obtenue grâce au modèle numérique d'élévation, aux différents points de référence connus en X, Y, Z et aux paramètres d'orientation de la chambre de prise de vue. Ces processus permettent donc d'afficher le cliché dans un contexte spatial. Pour effectuer le géoréférencement et l'orthorectification des clichés, nous avons choisi la projection adéquate (UTM WGS 84 Z 18 Row T), entré les données de calibration de la caméra, collecté les points fiduciaux, collecté les points de référence sur la photographie aérienne à partir d'une couche vectorielle (BDTQ 1 : 20 000 route et hydrographie), et ce, avec un minimum de 6 points par clichés et, enfin, prélevé l'altitude à partir du MNE créé précédemment. Suite à ces actions, nous avons pu utiliser les mosaïques finales de photographies aériennes, qui ont une précision de pixel de 0,635 mètre au sol, pour effectuer les mesures de l'évolution morphologique de la rivière Saint-Maurice afin de déceler les tendances dans la variabilité temporelle de la largeur du chenal et de la superficie des îles de l'embouchure.

3.3.2 Mesures de la largeur du chenal

La méthode de traçage du chenal a été élaborée par Laurencelle (2007) et a été effectuée à partir de ArcMap où il a programmé un nouvel outil dans les macros du programme. Ce travail a consisté en la reconstitution linéaire du cours d'eau étudié, ici la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle, et ce, pour chaque décennie choisie (1948, 1964, 1975, 1985, 1993 et 2008). Nous avons donc vectorisé le chenal principal du cours d'eau en fonction des éléments paysagers nous permettant de délimiter le plus précisément possible la limite supérieure du chenal (largeur à plein bord). Nous avons tenu compte du point de rupture de pente et de la végétation riveraine

à certains endroits sans tenir compte de la fluctuation du niveau d'eau et du débit dans la rivière afin de limiter les erreurs. Par la suite, nous avons déterminé l'axe central du chenal grâce à une interpolation linéaire entre la rive droite et la rive gauche, et ce, à partir de l'outil *3D Analyst* dans ArcMap (Alibert, 2007). Grâce à cet axe central, nous avons pu créer des points de références à tous les 20 mètres, et ce, tout le long de la section analysée. Les points de références ainsi créés nous ont permis de prendre des mesures de largeur perpendiculairement à l'axe central. La nouvelle fonction développée par Laurencelle (2007) nous a permis de réaliser ces perpendiculaires automatiquement au travers du chenal afin d'être en mesure de calculer la largeur à pleins bords, et ce, à de multiples endroits sur la rivière.

De manière à évaluer toutes variations locales, les mesures de largeur ont été prélevées aux mêmes endroits (points de références identiques) durant toutes les années analysées. Nous avons aussi décidé de considérer la variabilité longitudinale de la largeur du chenal de la rivière dans notre recherche à l'aide de la méthode de Lombard. Cela nous a permis d'être en mesure de repérer les changements significatifs dans la moyenne de la largeur à plein bord.

Les mesures de largeur du chenal calculé à partir des perpendiculaires nous ont donc permis d'obtenir des renseignements essentiels sur l'évolution morphologique de la rivière Saint-Maurice. La comparaison des séries de photographies aériennes nous a permis de vérifier la variabilité longitudinale et temporelle de la largeur du chenal de la rivière Saint-Maurice, et ce, à travers 6 décennies distinctes.

3.3.2.1 Analyses statistiques de la largeur du chenal

Les méthodes d'analyses statistiques utilisées pour étudier les résultats découlant de l'examen multi-date (Gurnell, 1997; Galster et al., 2008) des photographies aériennes ont été les mêmes pour toutes les données (Laurencelle, 2007). Nous avons obtenu plusieurs mesures de largeur annuellement qui ont été compilées dans un fichier afin que

nous puissions comparer celles-ci d'une année à l'autre. Nous avons ensuite soumis ces résultats à différentes analyses statistiques de base :

La moyenne

La moyenne arithmétique nous donne la somme de valeur numérique divisée par le nombre de valeur totale. Dans cette étude, elle nous a représenté la largeur moyenne du chenal de la rivière Saint-Maurice à chaque décennie.

$$\text{Équation de la moyenne : } \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

L'écart type

Elle mesure la dispersion d'une série de valeurs autour de la moyenne. Elle est représentée mathématiquement comme étant la racine carrée de la variance.

$$\text{Équation de la variance : } \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n} \quad \sigma = \text{Racine carrée de la variance} \quad (12)$$

** Nombre de mesures de largeur constantes d'une année à l'autre (N = fixe)

L'analyse de variance

L'ANOVA est une méthode statistique qui permet de comparer les moyennes de deux ensembles de données ou plus. Celle-ci peut être vue comme une comparaison multiple de moyennes où la variable étudiée est un caractère quantitatif de type continu suivant une loi normale. Cette méthode utilise des mesures de variances (formule écart-type) afin de déterminer le caractère significatif des différences. Le test de Tukey ou le test de la différence franchement significative (différences de moyennes constituant la paire), complètera l'analyse en générant des indicateurs statistiques nets.

3.3.2.2 Mesures de terrains complémentaires

Nous avons réalisé les mesures de terrain au cours de l'été 2009 afin d'effectuer une caractérisation générale des berges de la rivière (zones érosions actives, qualité des bandes riveraines, hauteur des talus, etc.) ainsi que pour déterminer la largeur moyenne du chenal à des endroits spécifiques. Cette moyenne a été comparée à celle déterminée avec les photographies aériennes. Dans ce but, nous avons utilisé différents appareils :

- Un télémètre électronique LASER 1200S de Nikon afin de tracer les perpendiculaires le long de la rivière et déterminer ainsi la largeur à chaque station de mesure. La précision de cet appareil de mesure se situe à +/- 0.5 mètre, selon les conditions météorologiques et les objets à mesurer (annexe B – Mesures de terrain versus mesures des photographies aériennes – Validation du télémètre - Erreurs).
- Un GPS eTrex Legend HCx de GARMIN équipé d'une antenne pour obtenir la meilleure précision possible au niveau du positionnement (moins de 3 mètres, 95 % du temps). Le but de cette manœuvre de terrain était de localiser avec exactitude les zones en érosion active sur la rivière.

3.3.3 Mesures de la superficie des îles

Les mesures de la superficie des îles de l'embouchure, soit l'île St-Christophe (A), St-Quentin (B) et Caron (C) ont été prises à partir des mêmes séries de photographies aériennes mentionnées précédemment sauf pour l'année 1993 qui a été remplacée par l'année 1996 (1948, 1964, 1975, 1985 et 2008). Cette étape nous a permis de comprendre l'évolution de la taille des îles au travers de 6 décennies différentes. Pour ce faire, nous avons tracé le contour des îles à partir des photographies aériennes sur des couches vectorielles vierges dans ArcMap (ESRI). Ce processus nous a permis d'obtenir avec précision la superficie des îles, en plus de nous donner la possibilité de comparer l'évolution des formes (sédimentation/érosion) des îles étudiées.

3.4 Analyse des impacts des activités anthropiques

Sachant que l'urbanisation du territoire influence les caractéristiques hydrologiques et morphologiques des cours d'eau (Gregory, 2006), l'étude des impacts des activités anthropiques dans le cadre de notre projet de recherche sur le phénomène d'érosion sur la rivière Saint-Maurice devenait importante. De fait, le paysage situé aux abords de la rivière a beaucoup changé dans le temps en raison de l'urbanisation du territoire et des changements qui se sont produits au niveau industriel et commercial. Les préoccupations grandissantes des riverains concernant le nautisme, les effets des vagues, la fluctuation des débits, la dénaturalisation des berges et bien d'autres inquiétudes liées aux activités humaines, nous amènent à modifier nos façons de faire en matière de gestion des cours d'eau. Il est primordial de s'attarder aux phénomènes locaux associés à la présence humaine sur les rives, car ne négligeons pas le fait que la section étudiée est constituée à 85 % de terres riveraines privées.

3.4.1 Calcul de l'indice de qualité des bandes riveraines (IQBR)

L'utilisation de l'indice de qualité des bandes riveraines élaborée par St-Jacques et *al.* (1998) nous a permis de faire une évaluation de la condition écologique de l'habitat riverain. L'IQBR a ainsi permis de caractériser la qualité des rives et d'établir la relation entre la qualité des rives et l'intensité de l'activité humaine présente en périphérie du cours d'eau. Comme St-Jacques et *al.* (1998) le mentionnent dans leur étude « la caractérisation de la bande riveraine et l'évaluation de sa condition écologique pourraient permettre une mise en relation directe entre la qualité de l'habitat de l'écosystème riverain et celle retrouvée dans les cours d'eau ».

Pour procéder à l'IQBR, la première étape a été d'effectuer la caractérisation des bandes riveraines par photo-interprétation. Pour ce faire, nous avons utilisé la mosaïque de photographies de l'année 2008, soit la plus récente. Nous avons caractérisé les bandes riveraines de la section urbaine de la rivière seulement puisque les berges de la section plus en amont sont pour la plupart entièrement forestières. Pour la caractérisation, nous avons emprunté la méthodologie de l'étude de St-Jacques et *al.* (1998) : la rivière a été

divisée en segment distinct d'une longueur approximative de 1000 mètres et d'une largeur de 30 mètres chacun. Les éléments constituant la bande riveraine ont été séparés en neuf classes principales (constituantes de la bande riveraine) regroupant les forêts, les arbustaies, les herbaçaies naturelles, les cultures, les friches et les pâturages, les coupes forestières, les sols nus, les socles rocheux et finalement les infrastructures (St-Jacques *et al.*, 1998) (figure 3.2).

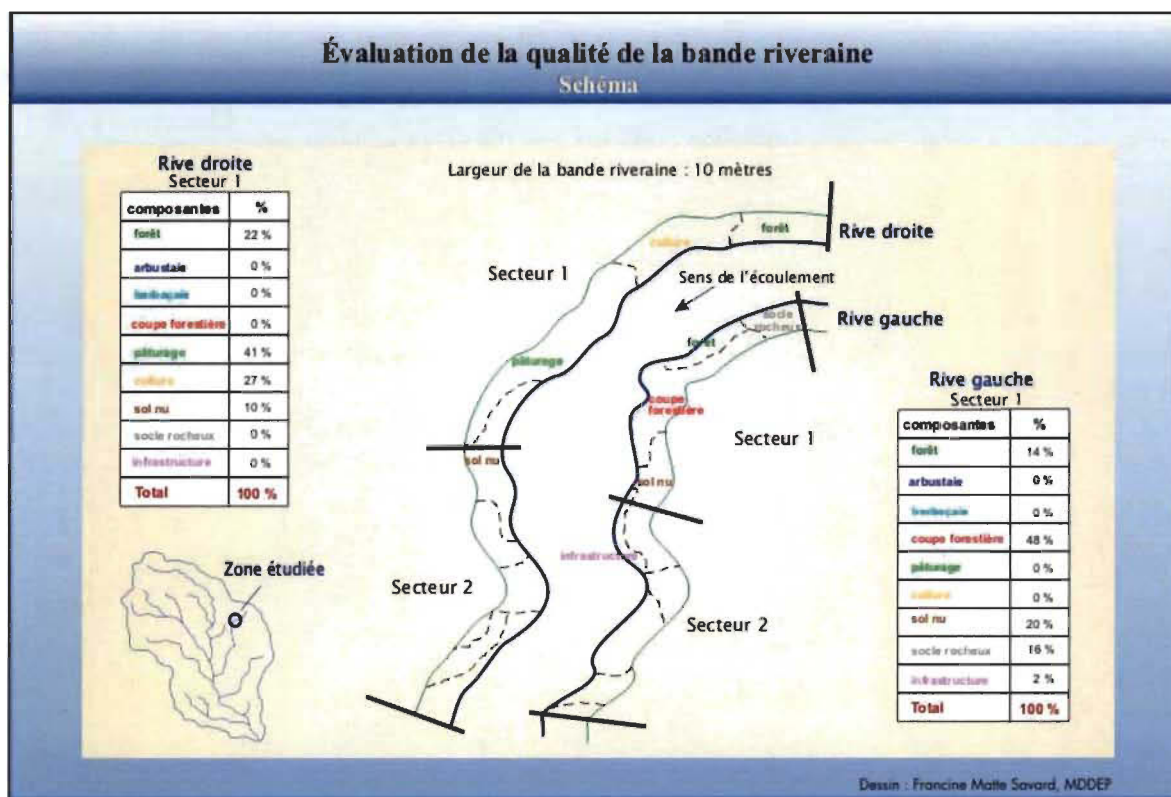


Figure 3.2 Schéma de l'évaluation de la qualité de la bande riveraine (MDDEP).

Les renseignements recueillis sur chacune des rives ont été compilés dans un tableur Excel qui calcule automatiquement la cote à attribuer à une section de rivière selon les caractéristiques entrées en pourcentage dans chacune des neuf catégories faisant partie intégrale des écosystèmes riverains actuels (MDDEP, http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/IQBR/protocole.htm, consulté en ligne janvier 2010). La cote donnée estime le potentiel de chacune des composantes à remplir les fonctions écologiques de la bande riveraine (contrôle de la pollution diffuse, stabilisation des berges et protection contre l'érosion, régularisation de la température et

de l'hydrosystème, réduction de l'évapotranspiration, recharge de la nappe phréatique, création d'habitats, source d'apports allochtones, maintien de la biodiversité et préservation de l'état naturel). Pour chaque composante de la bande riveraine, St-Jacques et *al.* (1998) ont déterminé des facteurs de pondération selon deux principaux facteurs soit l'importance relative de chacune des composantes pour le maintien de l'intégrité écologique de l'écosystème riverain (vie aquatique et terrestre) et la superficie qu'occupe chacune des composantes sur les rives.

Dans le tableur Excel du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs que nous avons utilisé dans le cadre de ce projet, l'Indice de Qualité des Bandes Riveraines se calcule comme suit :

$$IQBR = \frac{[\sum (d_i \times P_i)]}{D} \times 10$$

- i = nième composante (ex. : forêt, arbustaie, etc.)
- d_i = distance couverte par la nième composante (m)
- P_i = facteur de pondération de la nième composante, un nombre compris entre 1,7 et 10
- D = somme des distances couvertes par chacune des composantes

(13)

3.4.2 Analyse des effets du démantèlement des estacades

Cette analyse a été effectuée par photo-interprétation à partir des séries de photographies aériennes de l'année 1993 (avant démantèlement) et 2008 (après démantèlement). Nous avons comparé les effets du démantèlement des estacades sur les berges et sur leur intégrité écologique. Nous avons choisi 6 emplacements d'estacades différents à étudier et nous avons prélevé des images de ces sections avant et après le démantèlement des estacades afin de pouvoir percevoir les changements d'affectation du sol qui ont pu avoir lieu suite à la modification d'usage de la rivière (flottage, nautisme et récréotourisme). Cette analyse nous a informés sur les impacts possibles des activités anthropiques sur la qualité des bandes riveraines et sur l'augmentation des activités nautiques dans cette portion urbaine du chenal.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

4.1 Analyse hydrologique

4.1.1 Rivière Saint-Maurice, Station La Gabelle

4.1.1.1 Variabilité interannuelle des débits

La variabilité interannuelle des débits moyens et maximums printaniers n'est caractérisée par aucun changement significatif (seuil de signification de 5 %). En effet, la régression linéaire (figures 4.1 et 4.2) et le test de Lombard (tableau 4.1) (valeur critique de $0,0403 = p \leq 0,05$) nous ont démontré que les débits moyens et maximums printaniers n'avaient pas subi de changement significatif dans le temps.

Par contre, les débits moyens et maximums hivernaux de la rivière Saint-Maurice ont connu une hausse statistiquement significative dans le temps. De fait, la régression linéaire et le test de Lombard sont significatifs au seuil de 5 %. Ces dernières analyses nous ont démontré une tendance significative à l'augmentation des débits moyens hivernaux (figure 4.3). En ce qui concerne les débits maximums hivernaux analysés avec la méthode de la régression linéaire, aucun changement significatif n'a été constaté dans le temps (figure 4.4). Par contre, le test de Lombard a révélé un changement significatif de ces débits. Rappelons que ce test est plus puissant que la régression linéaire. Ces résultats sont compilés dans le tableau 4.1. Signalons que le test de Lombard révèle aussi que cette augmentation des débits moyens et maximums hivernaux découle d'un changement progressif dans le temps. Ce changement a débuté depuis le début de mesures des débits, c'est-à-dire depuis la construction de la centrale en 1924.

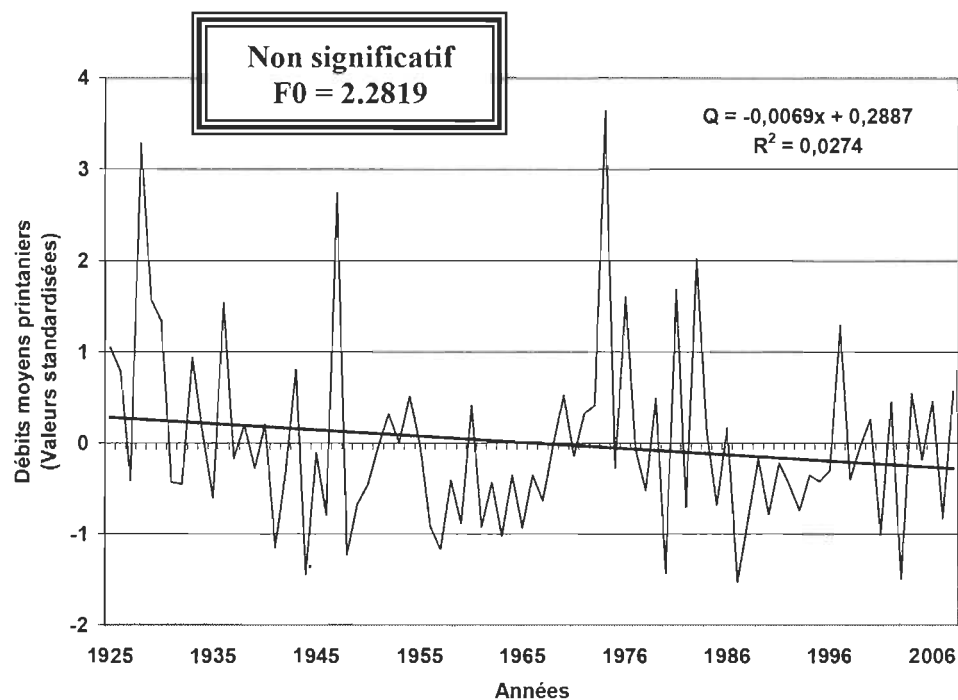


Figure 4.1 Débits moyens printaniers – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).

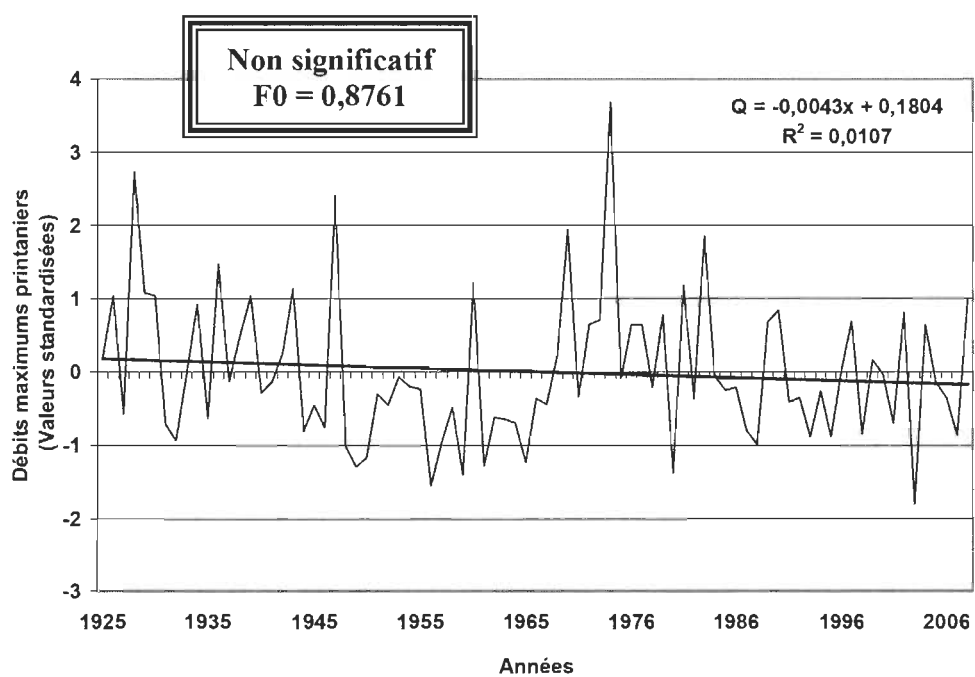


Figure 4.2 Débits maximums printaniers – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).

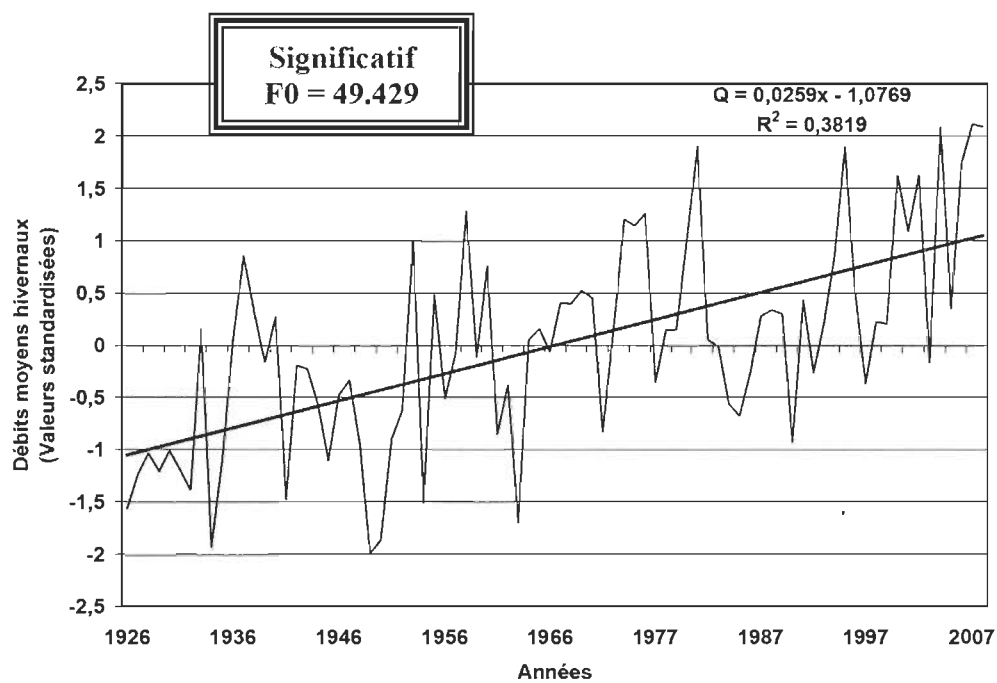


Figure 4.3 Débits moyens hivernaux – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).

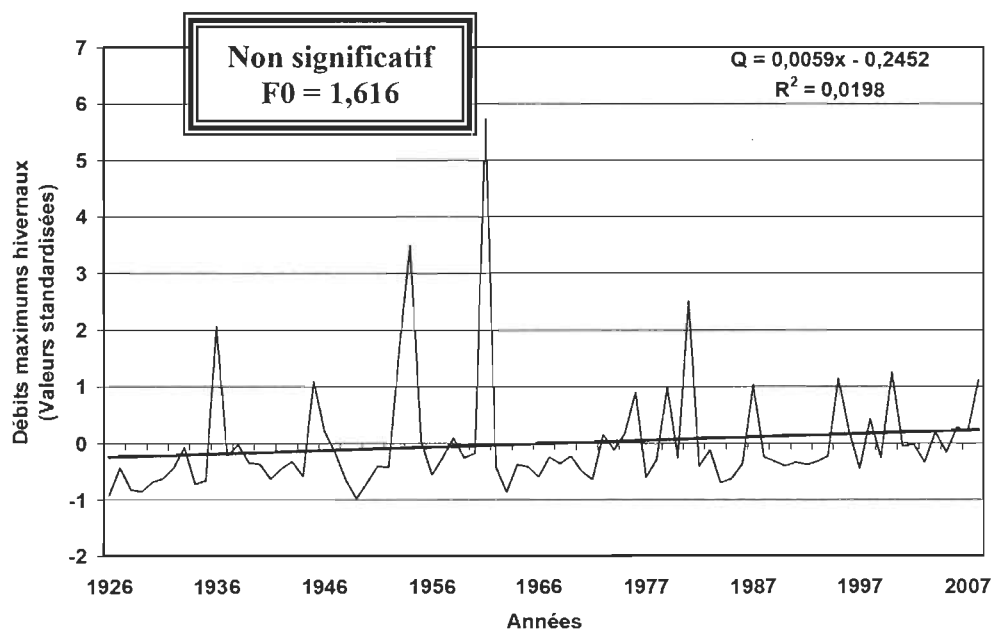


Figure 4.4 Débits maximums hivernaux – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).

Tableau 4.1

Résultats du test de Lombard – Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle)

Rivière	Paramètres	Moyenne (1)		
		Sn1	t1	t2
Saint-Maurice La Gabelle Maximums	Hiver	0.1267	2	83
			1927-2008	
Saint-Maurice La Gabelle Moyens	Printemps	0.0167	-	-
	Hiver	0.2927	1	83
			1926-2008	
	Printemps	0.0067	-	-

Valeur critique = 0,0403 ($p \leq 0,05$)

4.1.1.2 Succession des périodes hydroclimatiques des débits saisonniers de la rivière Saint-Maurice

La succession des périodes hydroclimatiques des débits moyens printaniers est caractérisée par quatre périodes distinctes (figures 4.5 et 4.7) :

- Une période humide (valeurs des débits lissés supérieures à la moyenne arithmétique de la série) durant la décennie 1930. Cette période est caractérisée par une augmentation de la fréquence des crues de récurrence ≥ 2 ans.
- Une période sèche (valeurs des débits lissés inférieures à la moyenne arithmétique de la série) qui s'étend de 1940 jusqu'à la fin des années 1960. Durant cette période, le nombre de crues de récurrence ≥ 2 ans a significativement diminué.
- Une nouvelle période humide durant la décennie 1970. À ce moment, le nombre de crues de récurrence ≥ 2 ans a significativement augmenté. Nous avons répertorié trois crues de récurrence de 50 ans durant cette période.

- Enfin, une nouvelle période sèche qui perdure depuis le début de la décennie 1980. La fréquence de fortes crues a de nouveau diminué.

La succession des périodes hydroclimatiques des débits moyens hivernaux est caractérisée par deux périodes distinctes (figures 4.6 et 4.8) :

- Une période sèche qui s'étend de 1930 jusqu'à la fin des années 1960.
- Une période humide depuis la décennie 1970 jusqu'à aujourd'hui.

Il est important de mentionner qu'aucune crue de récurrence de 2, 5, 10 ou 50 ans n'a été atteinte ou dépassée durant la saison hivernale, et ce, malgré l'augmentation significative des débits maximums hivernaux.

Les crues de récurrence calculée selon la méthode d'analyse hydrologique régionale développée par Anctil et *al.* (1998) ont toutes été atteintes et dépassées à plusieurs reprises durant la saison printanière en aval de la centrale La Gabelle (tableau 4.2).

Tableau 4.2

Nombre de récurrences de crue (2, 5, 10 et 50 ans)
Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle)

Récurrence de crue	Hiver	Printemps
2 ans	0	157
5 ans	0	23
10 ans	0	13
50 ans	0	3

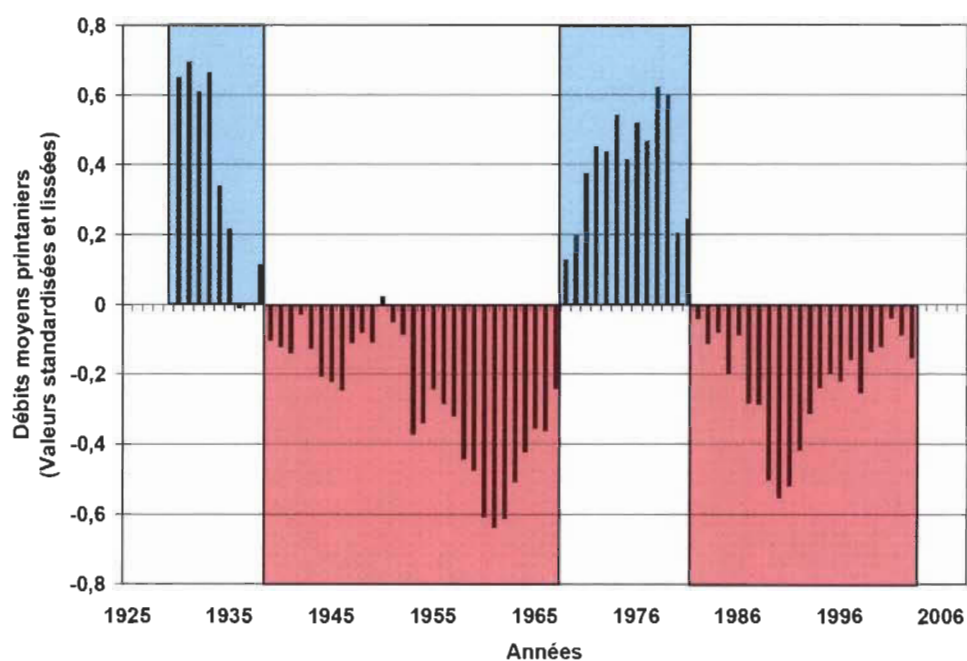


Figure 4.5 Moyenne mobile simple calculée sur 10 ans – Débits moyens printaniers Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).

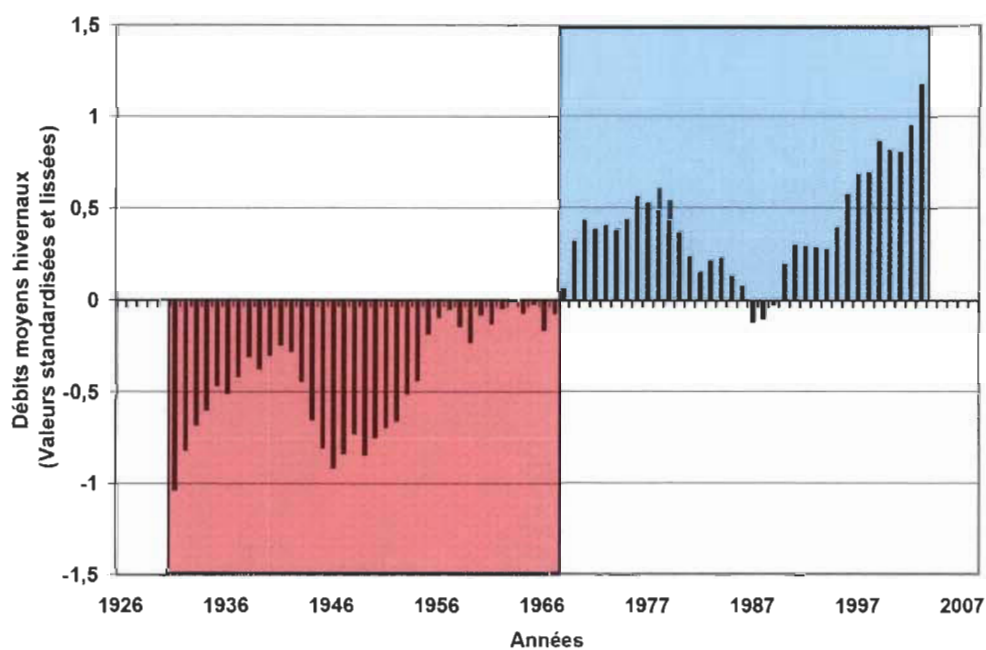


Figure 4.6 Moyenne mobile simple calculée sur 10 ans – Débits moyens hivernaux Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).

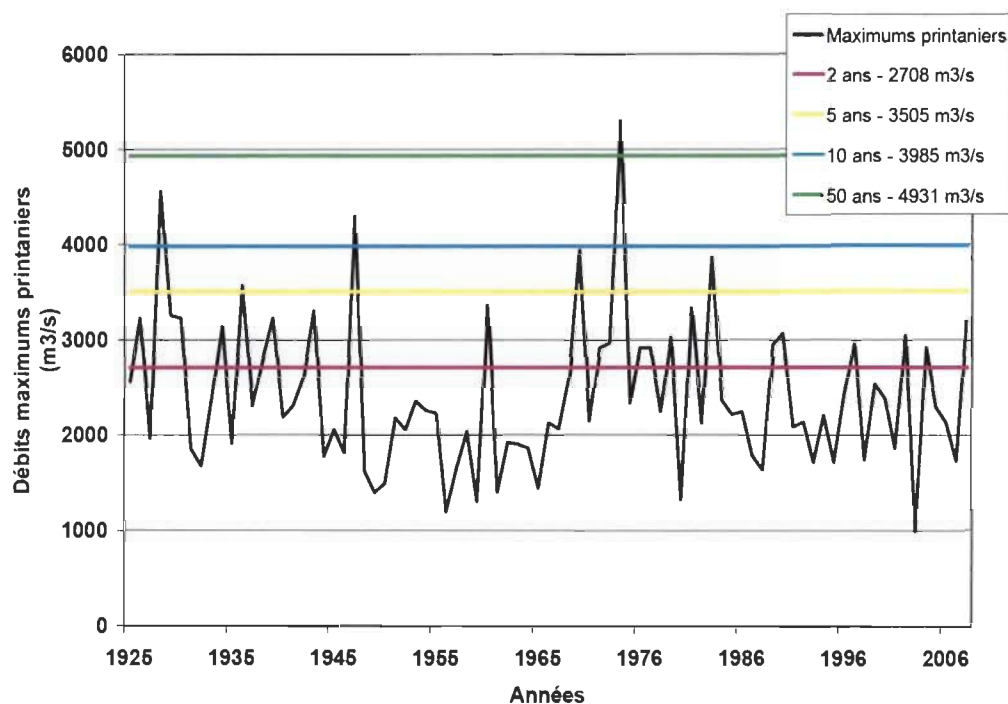


Figure 4.7 Analyse régionale d'estimation des crues – Débits maximums printaniers Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).

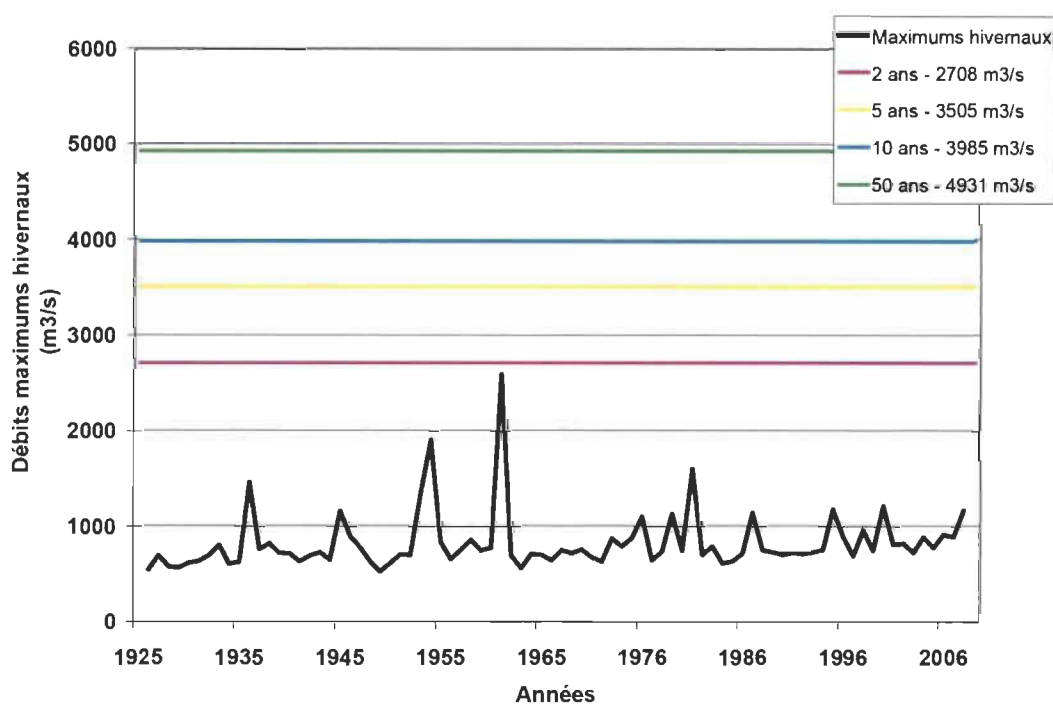


Figure 4.8 Analyse régionale d'estimation des crues – Débits maximums hivernaux Rivière Saint-Maurice (Centrale La Gabelle).

4.1.2 Fleuve Saint-Laurent, Station Sorel

4.1.2.1 Variabilité interannuelle des niveaux d'eau

La variabilité interannuelle des niveaux d'eau moyens printaniers et hivernaux est caractérisée par une diminution significative dans le temps. La régression linéaire et le test de Lombard qui sont statistiquement significatifs au seuil de 5 % ont tous deux démontré cette diminution significative des niveaux d'eau moyens saisonniers (figures 4.9 et 4.10 et tableau 4.3). En ce qui concerne les niveaux d'eau moyens printaniers, le changement est survenu entre les années 1955 et 1957. Quant au changement pour les niveaux d'eau moyens hivernaux, il est survenu entre les années 1979 et 1980. Il s'ensuit que durant les deux saisons, ce changement est de nature brusque, mais il n'est pas synchrone. Le changement printanier est antérieur au changement hivernal.

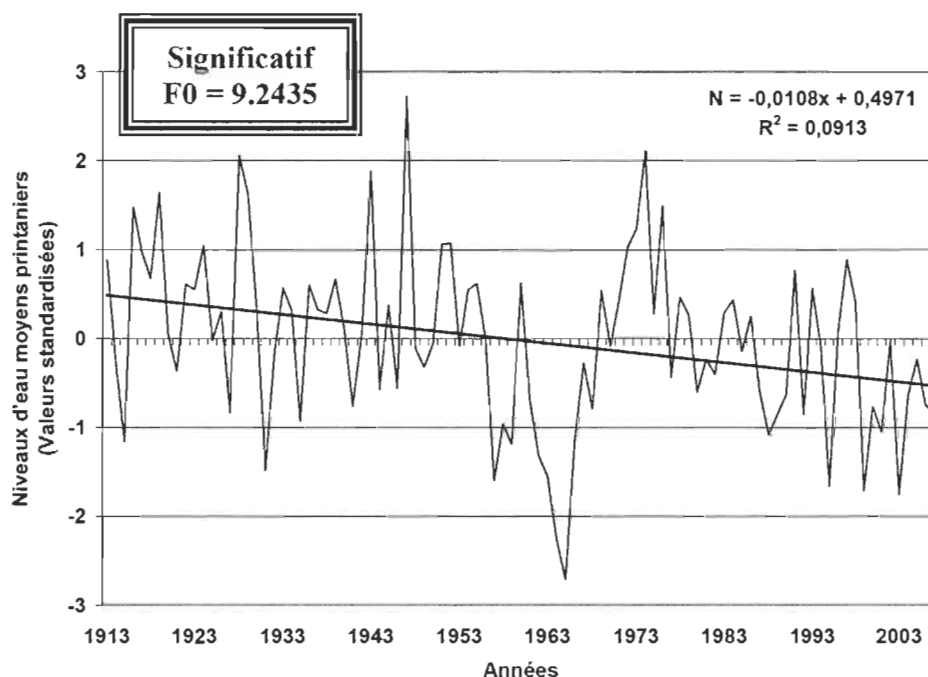


Figure 4.9 Niveaux d'eau moyens printaniers – Fleuve Saint-Laurent (Sorel).

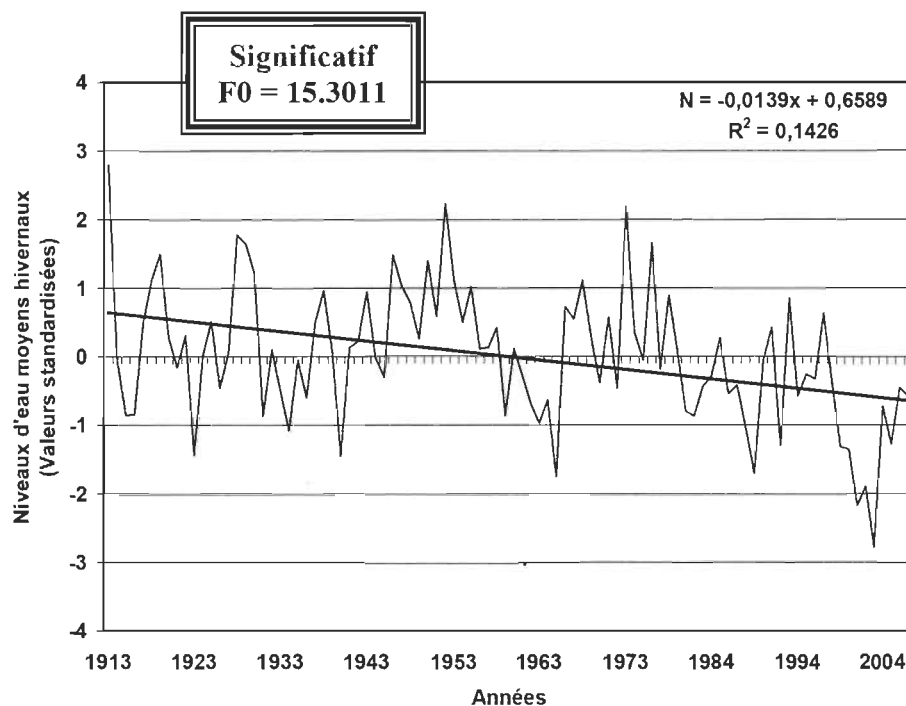


Figure 4.10 Niveaux d'eau moyens hivernaux – Fleuve Saint-Laurent (Sorel).

Tableau 4.3

Résultats du test de Lombard – Fleuve Saint-Laurent (Sorel)

Rivière	Paramètres	Moyenne (1)		
		Sn1	t1	t2
Fleuve Saint-Laurent Station Sorel Moyenne	Hiver	0.1177	66	67
			1979-1980	
	Printemps	0.0908	42	44
			1955-1957	

Valeur critique = 0,0403 ($p = \leq 0,05$)

4.1.2.2 Succession des périodes hydroclimatiques des niveaux d'eau saisonniers du fleuve Saint-Laurent

La succession des périodes hydroclimatiques des niveaux d'eau moyens printaniers est caractérisée par six périodes distinctes (figure 4.11) :

- Une période humide du début de la série hydrologique jusqu'aux années 1930.
- Une courte période sèche au milieu des années 1930.
- Une période humide durant les décennies 1940 et 1950.
- Une autre courte période sèche durant les années 1960.
- Une période humide durant la décennie 1970.
- Enfin, une période sèche depuis le début de la décennie 80 jusqu'à aujourd'hui.

La succession des périodes hydroclimatiques des niveaux d'eau moyens hivernaux est caractérisée par quatre périodes distinctes (figure 4.12) :

- Une période humide qui s'étend des années 1920 jusqu'au milieu des années 1950.
- Une période sèche durant la décennie 1960.
- Une période humide durant la décennie 1970.
- Enfin, une période sèche qui perdure depuis le début de la décennie 80.

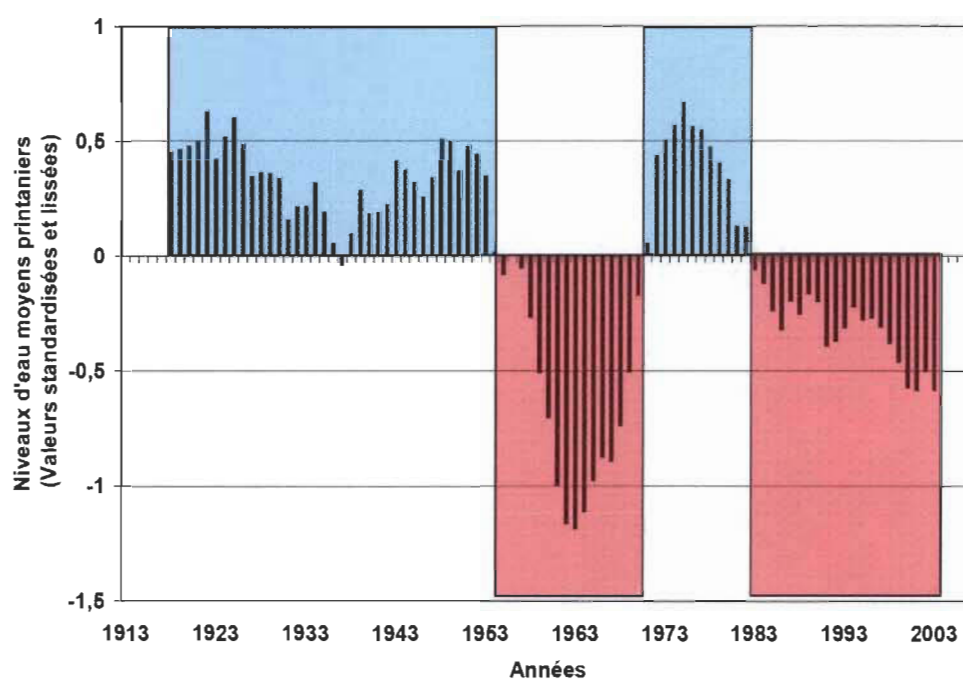


Figure 4.11 Moyenne mobile simple calculée sur 10 ans – Niveaux d’eau moyens printaniers – Fleuve Saint-Laurent (Sorel).

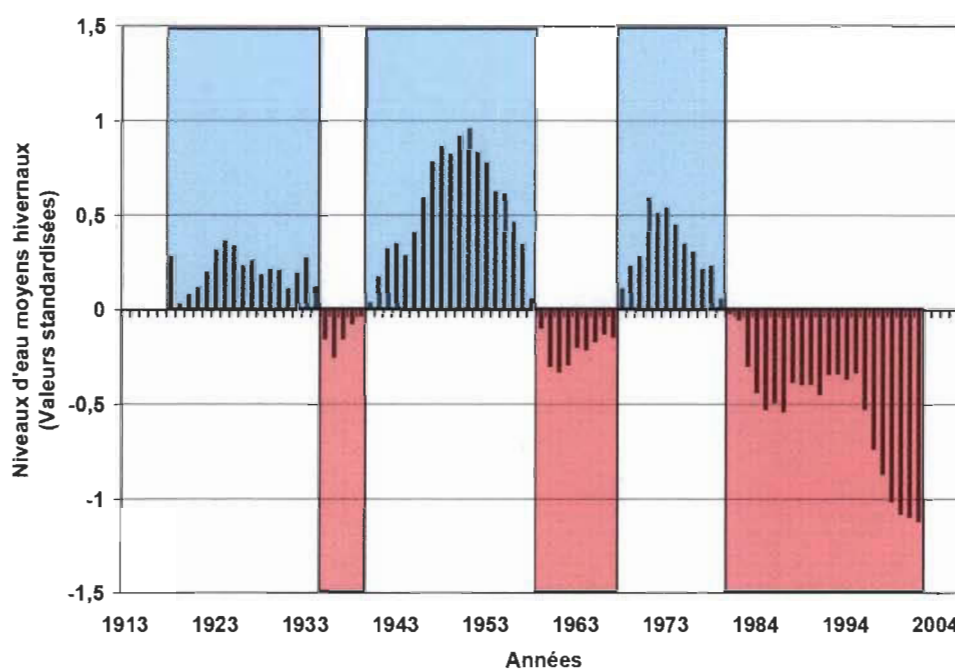


Figure 4.12 Moyenne mobile simple calculée sur 10 ans – Niveaux d’eau moyens hivernaux – Fleuve Saint-Laurent (Sorel).

4.1.3 Conclusion de l'analyse hydrologique saisonnière

L'analyse de la variabilité interannuelle des débits de la rivière Saint-Maurice et des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent a révélé une hausse progressive des débits moyens hivernaux de la rivière Saint-Maurice, mais une baisse significative, survenue en 1980, des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent durant la même saison. Au printemps, aucun changement significatif des débits n'a été observé en aval de la centrale La Gabelle, mais en revanche, les niveaux d'eau du fleuve ont significativement diminué. Cette diminution est survenue au milieu de la décennie 1950.

La variabilité interannuelle des débits de la rivière Saint-Maurice et des niveaux d'eau du fleuve est aussi jalonnée par une succession de périodes hydroclimatiques sèches et humides. Le nombre et la durée de ces périodes dépendent des saisons. Il n'existe aucun synchronisme de ces périodes en hiver entre la rivière Saint-Maurice et le fleuve Saint-Laurent. Toutefois, au printemps, on a observé un synchronisme de la période humide de la décennie 1970 et de la période sèche qui sévit depuis la décennie 1980 entre les deux cours d'eau.

4.2 Analyse morphologique

4.2.1 Variabilité longitudinale de la largeur du chenal

La variabilité longitudinale de la largeur moyenne à plein bord de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle en 1964 et en 2008 est présentée à la figure 4.13 et dans chacune des sections à la figure 4.14. L'application de la méthode de Lombard a révélé que cette variabilité est caractérisée par deux changements significatifs de la moyenne de la largeur à plein bord (tableau 4.4). Ces deux points de rupture se sont maintenus dans le temps. Le premier changement de la moyenne est de type abrupt, car il s'est produit sur une distance relativement courte alors que le second changement est de type progressif (il s'est produit sur une distance relativement longue) et monotonique (croissance constante). Ces deux changements se sont traduits par une augmentation de la moyenne de la largeur à plein bord de l'amont

vers l'aval. Sur la base de ces deux points de rupture, le chenal de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle a été subdivisé en trois tronçons (tableau 4.5). Ainsi, le taux d'augmentation de la moyenne de la largeur à plein bord est de 13.8 % dans le tronçon II (par rapport au tronçon I) puis de 48.4 % dans le dernier tronçon (par rapport au tronçon II). Ces taux se sont aussi maintenus dans le temps.

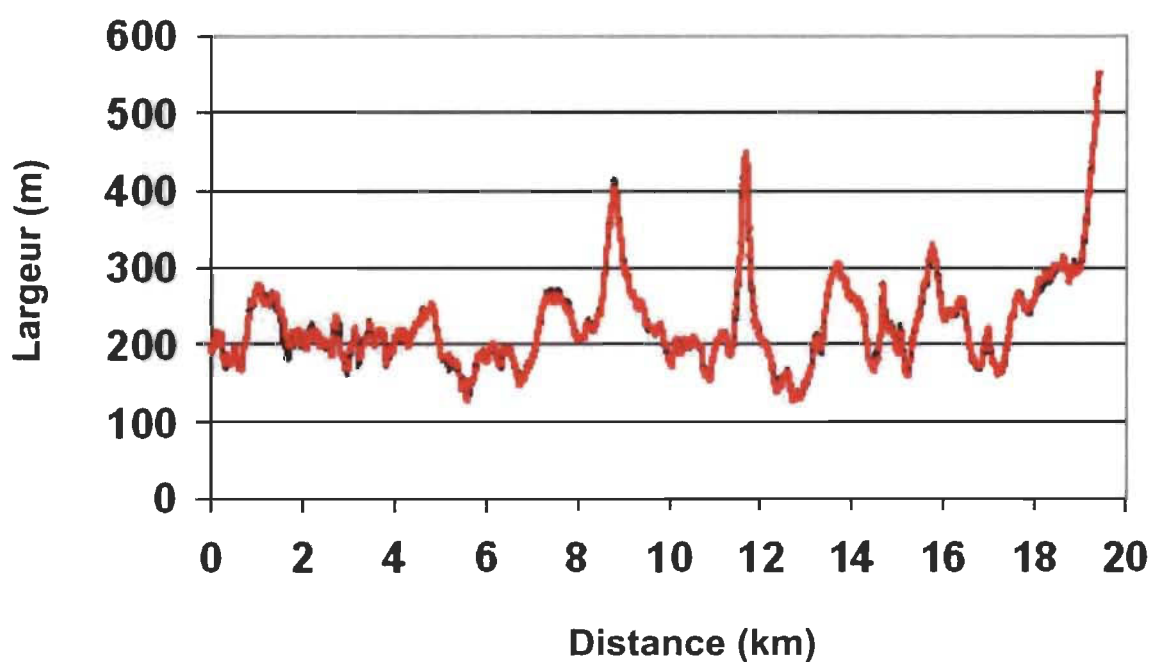


Figure 4.13 Variabilité longitudinale de la largeur à plein bord du chenal de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle en 1964 (courbe noire) et en 2008 (courbe rouge).

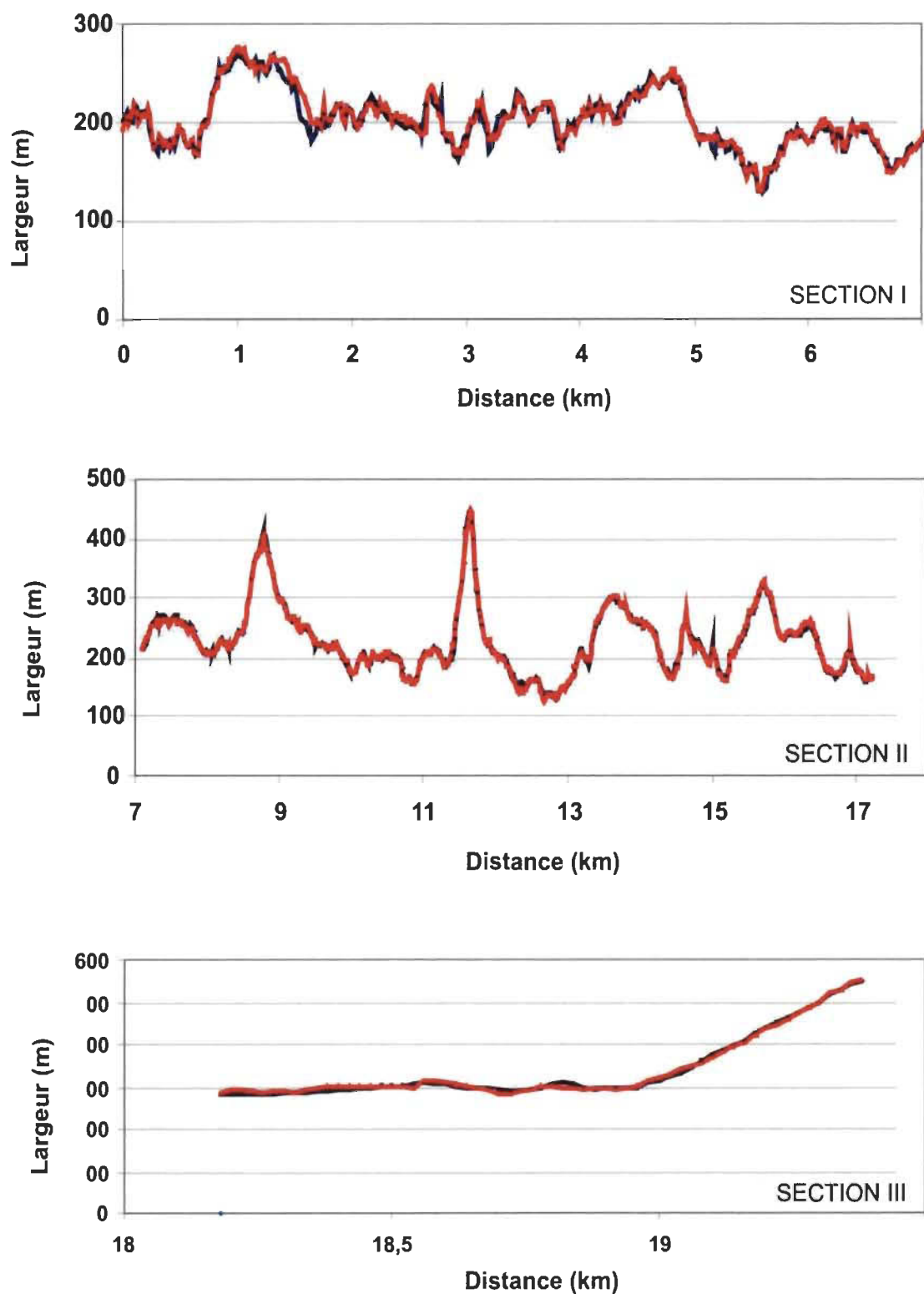


Figure 4.14 Comparaison de la largeur à plein bord du chenal de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle par sections en 1964 (courbe noire) et en 2008 (courbe rouge).

Tableau 4.4

Localisation des distances de ruptures de la moyenne de la largeur à plein bord de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle en 1964 au moyen de la méthode de Lombard

Paramètres	Moyenne rupture I	Moyenne rupture II
Sn	0.0784	0.7278
D1	7060	17260
D2	7100	18160

Sn = valeur de la statistique de Lombard. Les deux valeurs sont significatives au seuil de 5 %. D1 et D2 = Distance (en m) correspondant respectivement au début (D1) et à la fin (D2) de changement de la moyenne de la largeur à plein bord. Cette distance est définie à partir de la centrale de La Gabelle.

Tableau 4.5

Comparaison de la variabilité longitudinale des moyennes de la largeur à plein bord de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle en 1964.
Résultats du test de Lombard

Sections	Moyenne (m)	Écart type	Longueur total du tronçon (m)
I	201.3	28.65	7040
II	229.1	56.22	10120
III	340	77.06	1200

4.2.2 Variabilité temporelle de la largeur du chenal

La comparaison de la largeur moyenne du chenal de la rivière Saint-Maurice (Section I, II et III) à l'aide de l'ANOVA (figures 4.15, 4.16 et 4.17) a établi qu'aucun changement significatif (érosion/sédimentation) n'avait eu lieu au cours des 60 dernières années. Comme démontré dans le tableau 4.6, les variations de largeur dans le chenal de la rivière Saint-Maurice ne sont pas statistiquement significatives pour les trois sections.

Tableau 4.6
Résultats des ANOVA pour chacune des sections

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F-ratio	P
Section I	3130.715	4	782.679	0.967	0.425
<i>Erreur</i>	<i>1424855.343</i>	<i>1760</i>	<i>809.577</i>		
Section II	16515.134	5	3303.027	1.076	0.371
<i>Erreur</i>	<i>8322158.952</i>	<i>2712</i>	<i>3068.643</i>		
Section III	7496.943	5	1499.389	0.250	0.940
<i>Erreur</i>	<i>2163409.579</i>	<i>360</i>	<i>6009.471</i>		

Dans la section I située en amont des rapides des Forges, la largeur moyenne a été déduite à partir des 353 mesures de largeur prises toutes les décennies sélectionnées (1948, 1964, 1975, 1985, 1993 et 2008). La largeur moyenne à plein bord du tronçon a varié entre 201 (1964) et 205 mètres (1993), même si cette variation ne doit pas être considérée comme statistiquement significative (tableau 4.7). Dans la section II qui représente la portion centrale (aval rapide des Forges/avant portion urbaine) du secteur étudié, la comparaison de la largeur moyenne a été fondée sur les mesures effectuées à 507 points de références sauf pour l'année 1948 qui n'a compté que sur 183 points. La largeur moyenne du tronçon a varié entre 229 (1964) et 236 mètres (1948), même si cette variation ne doit pas être considérée comme statistiquement significative. Dans la section III représentant la portion urbanisée de la rivière, la comparaison de la largeur moyenne a été réalisée sur les mesures achevées à 61 points de références. La largeur moyenne du tronçon a varié entre 352 (1948) et 339 mètres (1964), même si cette variation ne doit pas être considérée comme statistiquement significative.

Tableau 4.7

Moyenne et écart-type (entre parenthèses) de la largeur à plein bord du chenal
(en mètres) – Rivière Saint-Maurice

Sections	1948	1964	1975	1985	1993	2008
I	-	201 (29) <i>353</i>	204 (28) <i>353</i>	203 (27) <i>353</i>	205 (29) <i>353</i>	202 (29) <i>353</i>
II	236 (43) <i>183</i>	229 (56) <i>507</i>	230 (57) <i>507</i>	230 (55) <i>507</i>	235 (57) <i>507</i>	229 (56) <i>507</i>
III	352 (81) <i>61</i>	340 (77) <i>61</i>	339 (76) <i>61</i>	343 (78) <i>61</i>	346 (78) <i>61</i>	341 (76) <i>61</i>

Les chiffres en italique représentent le nombre de points de références relevé annuellement. .

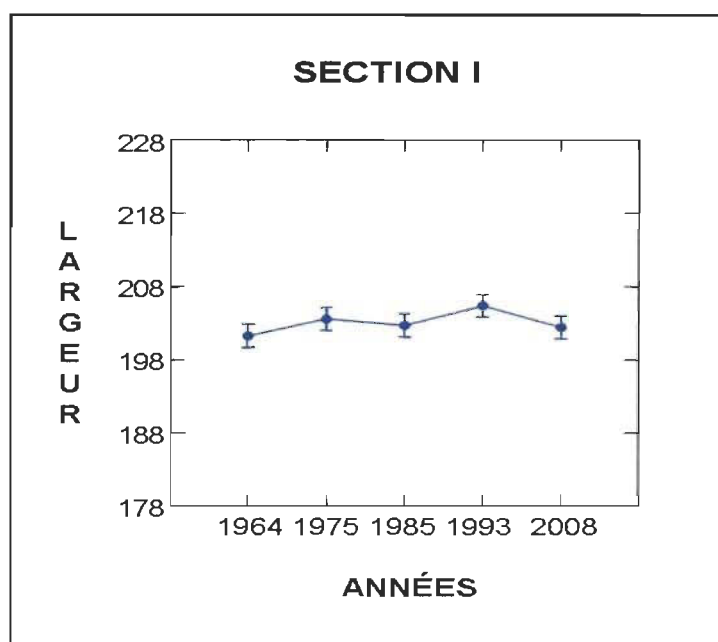


Figure 4.15 Relation entre les années et l'évolution de la largeur – Section I (ANOVA) – Rivière Saint-Maurice.

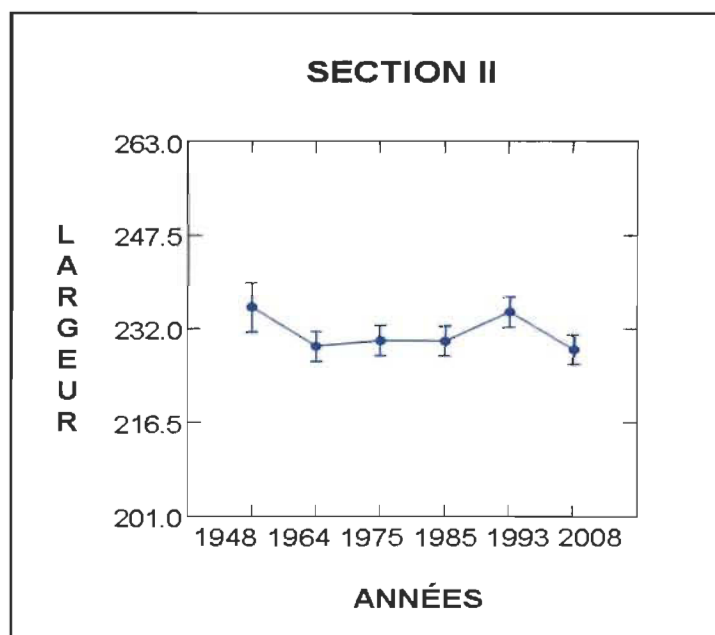


Figure 4.16 Relation entre les années et l'évolution de la largeur – Section II (ANOVA) – Rivière Saint-Maurice.

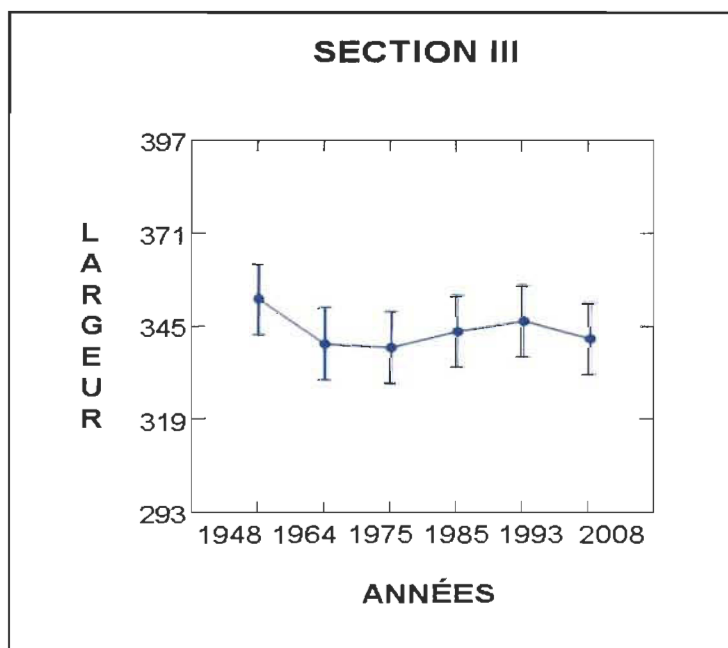


Figure 4.17 Relation entre les années et l'évolution de la largeur – Section III (ANOVA) – Rivière Saint-Maurice.

4.2.3 Variabilité temporelle de la superficie des îles

La figure 4.18 présente la variation temporelle de la superficie des îles de l'embouchure de la rivière Saint-Maurice (St-Christophe - A, St-Quentin - B et Caron- C localisés dans la figure 4.19) durant la période comprise entre 1948 et 2008. Dans le tableau 4.8 qui résume les phases d'érosion et d'accumulation subies en alternance par les trois îles de l'embouchure, on peut remarquer une tendance générale à l'accumulation si on compare directement l'année 1948 (débit : 1280 m³/s) et l'année 2008 (débit : 1420 m³/s) :

- Île A : 7.2 % de hausse de superficie.
- Île B : 4.1 % de hausse de superficie.
- Île C : 5.2 % de hausse de superficie.

Par contre, lors de l'analyse spécifique de chaque île, on constate que leur évolution morphologique est quelque peu différente selon leur emplacement dans le chenal et leur superficie. En ce qui concerne l'île A, qui est située plus en amont que les autres, on peut constater que son évolution morphologique est caractérisée par deux phases d'accumulation entre 1948 et 1975, contrairement à ce qu'on peut remarquer pour les deux autres îles. Cette accumulation a été suivie de deux courtes phases d'érosion, pour terminer avec une phase d'accumulation mineure (+ 1.3 %). Quant à l'île B (annexe C), sa plus grande phase d'accumulation, soit une augmentation de sa superficie de l'ordre de 6.8 %, a été constatée entre 1948 et 1964. Par la suite, sa superficie a significativement diminué (4 %) pour en définitive augmenter progressivement au cours des trois dernières décennies. Enfin, l'évolution morphologique de l'île C est similaire aux phases d'accumulation et d'érosion subies en alternance par l'île B. Effectivement, une première grande phase d'accumulation (+ 5.8 %) a été suivie d'une phase importante d'érosion (- 2.7 %) pour finalement subir trois autres légères phases d'accumulation entre 1975 et 2008.

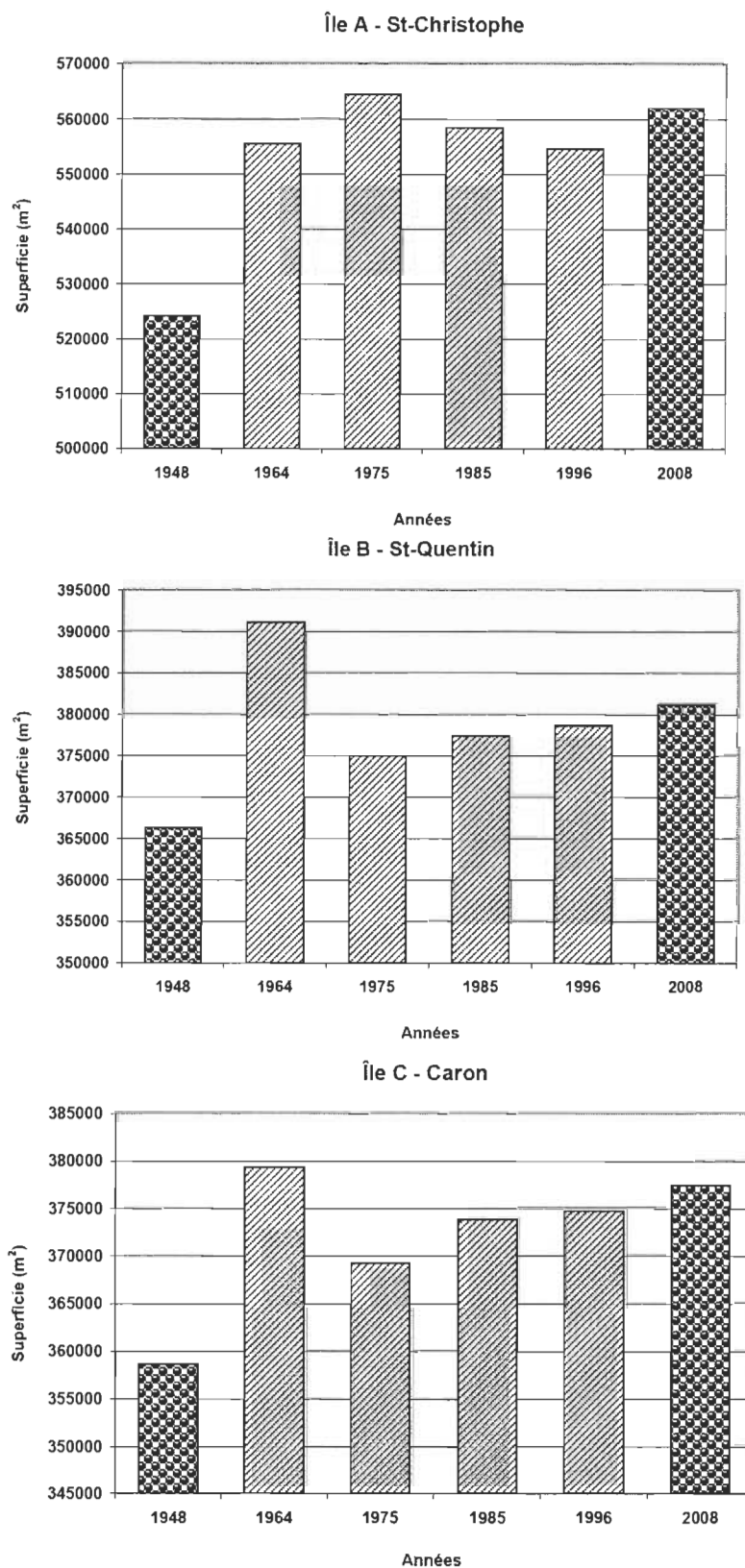
Les trois îles étudiées ont donc subi des processus d'érosion et d'accumulation similaire, particulièrement les îles B et C, dont la superficie a évolué de manière similaire au cours des dernières décennies.

Tableau 4.8

Variation de la superficie des îles (en m²) et phase constatée (érosion/sédimentation) durant la période 1948 à 2008

Années	Île A – St-Christophe	Phase	Île B - St-Quentin	Phase	Île C – Caron	Phase
1948	524260		366334		358688	
1964	555590	A + 6 %	391105	A + 6.8 %	379385	A + 5.8 %
1975	564599	A + 1.6 %	375066	É - 4 %	369302	É - 2.7 %
1985	558493	É - 1 %	377422	A + 0.6 %	373911	A + 1.2 %
1996	554696	É - 0.7 %	378696	A + 0.3 %	374770	A + 0.2 %
2008	562098	A + 1.3 %	381246	A + 0.7 %	377485	A + 0.7 %

A = Accumulation É = Érosion



Colonne liguée : Débits inférieurs à 500 m³/s lors de la prise de photo
 Colonne à point : Débits supérieurs à 500 m³/s lors de la prise de photo

Figure 4.18 Variation de la superficie des trois îles de l'embouchure, de 1948 à 2008.

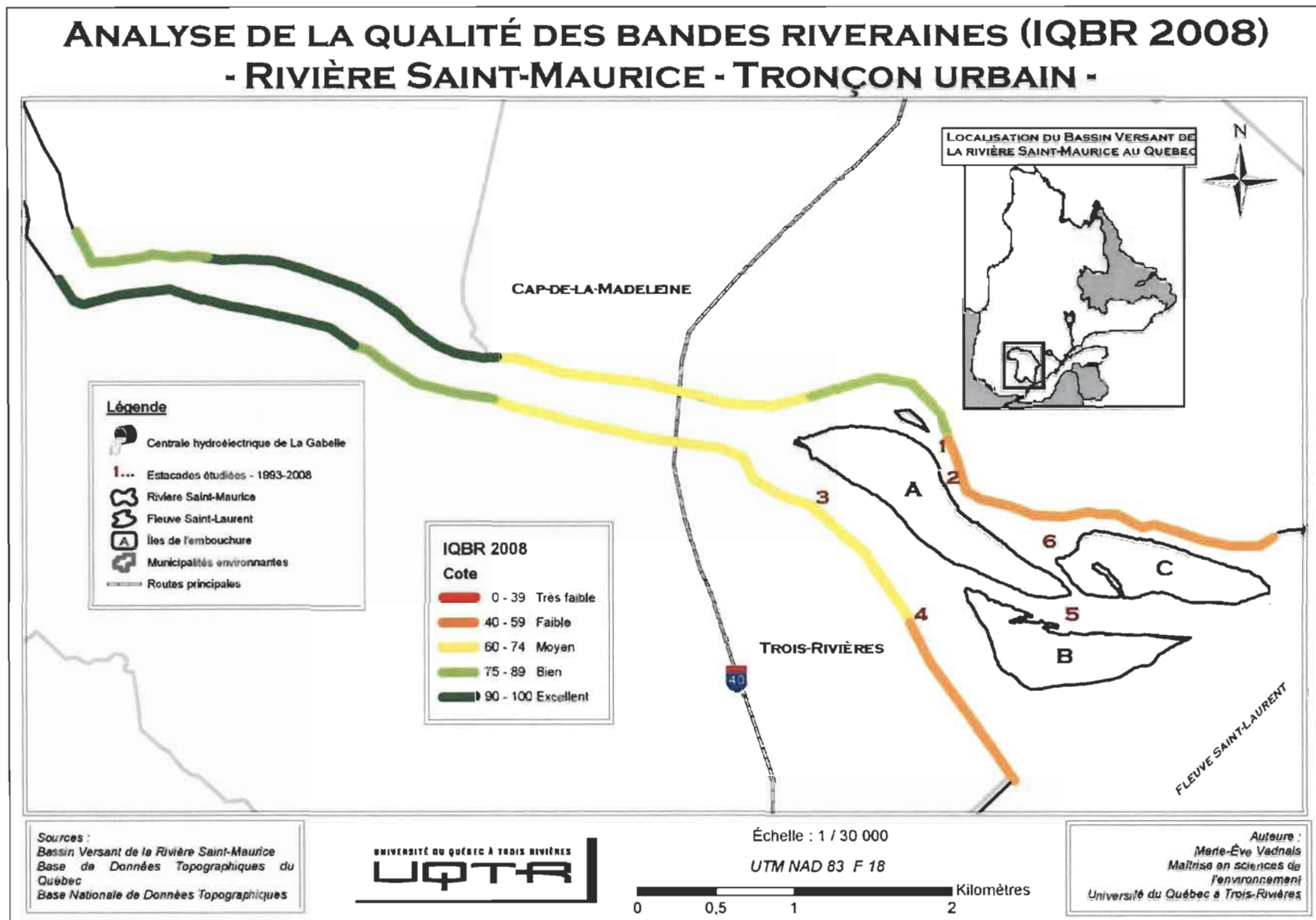
4.3 Analyse des impacts des activités anthropiques

4.3.1 Indice de qualité des bandes riveraines (IQBR)

La qualité des bandes riveraines varie considérablement le long du tronçon étudié de la rivière Saint-Maurice. Les forêts, pelouses, sols nus et infrastructures sont les principales composantes trouvées sur les rives de la rivière. Notons que la présence de chacune de ces composantes varie significativement selon la distance relative du secteur étudié par rapport au secteur urbain. En général, dans le secteur situé en amont du tronçon étudié, la forêt domine largement sur les rives contrairement à la portion plus en aval qui est plutôt recouverte en majeure partie par de la pelouse, du sol nu, des infrastructures et, dans une moindre mesure, de la forêt. La proportion d'infrastructures d'origine anthropique empiétant sur les rives est toutefois significativement plus élevée dans la portion située en aval, soit à la hauteur de la Ville de Trois-Rivières et du Cap-de-la-Madeleine, comparativement à la portion amont du tronçon. De façon générale, il y a une augmentation du ratio « infrastructure-forêt » sur les rives situées en aval de la rivière à proximité de la confluence avec le fleuve Saint-Laurent. La cote finale de l'indice de qualité des bandes riveraines (IQBR) estimée pour chacun des segments de rives étudiées se traduit comme suit (figure 4.19) :

- Les rives situées à proximité de la confluence de la rivière Saint-Maurice avec le fleuve Saint-Laurent sont celles dont l'IQBR est le moins élevé.
 - L'indice de qualité des bandes riveraines est : faible – cote de 40 à 59.
- Les rives situées jusqu'à la limite territoriale de la municipalité du Cap-de-la-Madeleine ont un IQBR moyen.
 - L'indice de qualité des bandes riveraines est : moyen – cote de 60 à 74.
- Les rives situées dans la portion amont du tronçon étudié ont un IQBR élevé.
 - L'indice de qualité des bandes riveraines est, selon l'endroit : bien – cote de 75 à 89 ou excellent – cote de 90 à 100.

Figure 4.19 Cartographie de la qualité des bandes riveraines (2008).



4.3.2 Effets du démantèlement des estacades

Les effets du démantèlement des estacades dans la portion urbaine (Trois-Rivières/Cap-de-la-Madeleine) de la rivière Saint-Maurice semblent être similaires d'un site à l'autre. De manière générale, les berges de la rivière ont vu une augmentation significative des emplacements disponibles pour les commodités nautiques, soit une dénaturalisation des berges et la détérioration de leur bande riveraine. Voici les constats généraux pour les six emplacements d'estacades étudiés (Localisation des estacades : figure 4.19) entre 1993 et 2008 (figure 4.20) :

- Aux sites des estacades 1, 2, 3 et 4, on peut constater l'apparition de commodité nautique (quai, descente de bateau, accès à la voie navigable) à plusieurs endroits sur les berges de la rivière.
- Aux sites des estacades 1, 2, 3 et 4, on peut constater la dénaturalisation des berges et la mise à nu du sol à certains endroits au profit du potentiel nautique de la rivière. Le site de l'estacade 3 est principalement touché par la mise en place d'infrastructures anthropiques au niveau de ses berges (enrochement). De plus, on peut aisément remarquer la détérioration de la bande riveraine (déboisement des rives et mise à nu du sol) au profit des infrastructures humaines.
- Aux sites des estacades 5 et 6, on peut constater une augmentation de l'accumulation de sédiments autour des petits îlots qui sont situés à proximité des îles de l'embouchure. On peut donc constater, principalement au site de l'estacade 5, un engraissement des îlots suite au démantèlement des estacades, ce qui a permis aux sédiments provenant de l'aval de la rivière de s'accumuler à ces endroits. On constate cet effet sur les photographies aériennes de 2008 même si le débit à la date de prise de vue est plus élevé qu'en 1993.
 - Débits
 - 1993 : 1020 m³/s
 - 2008 : 1420 m³/s

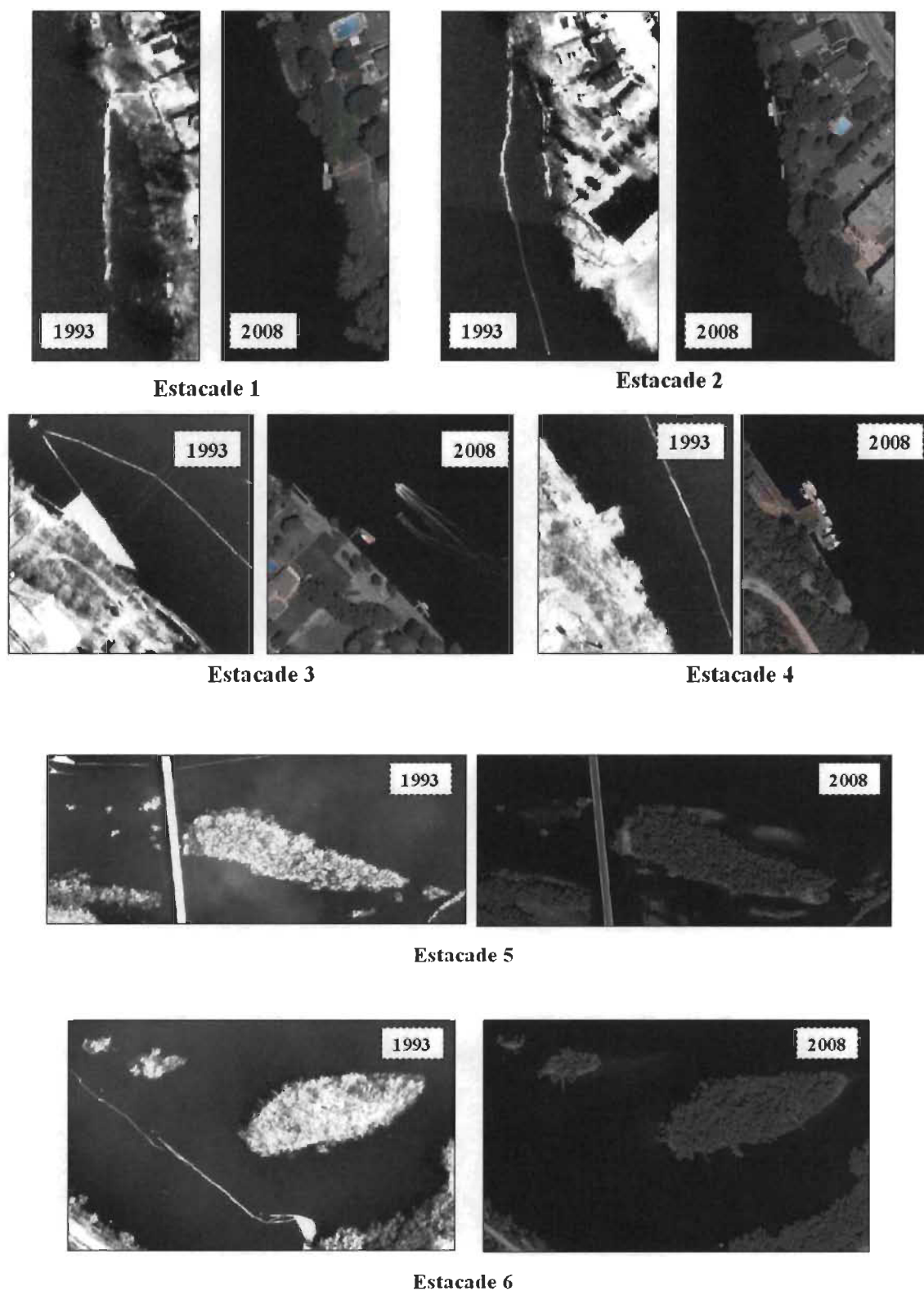


Figure 4.20 Photographies aériennes des sites d'estacades étudiées (1993-2008)
Rivière Saint-Maurice – Secteur Trois-Rivières/Cap-de-la-Madeleine.

CHAPITRE V

DISCUSSION-CONCLUSION

D'après les riverains, le chenal de la rivière Saint-Maurice situé en aval de la centrale La Gabelle est actuellement en proie à une forte érosion qui gruge progressivement leurs terrains. Toutefois, l'ampleur et la cause de cette érosion ne sont pas encore élucidées. L'objectif de notre travail était de quantifier ce phénomène d'érosion et de tenter de déterminer les facteurs en cause. Il est bon de rappeler que la rivière Saint-Maurice est l'un des affluents du fleuve Saint-Laurent les plus harnachés au Québec. Depuis le début du siècle passé, on y a érigé plus de 20 réservoirs et centrales hydroélectriques. La construction de ces nombreux ouvrages est susceptible d'avoir modifié significativement l'évolution morphologique du chenal de la Saint-Maurice. Outre ce facteur, d'autres facteurs de nature anthropiques se sont ajoutés après la construction de la centrale La Gabelle. Il s'agit notamment du creusement du chenal maritime dans le fleuve Saint-Laurent au milieu de la décennie 1950, qui sert de niveau de base de la rivière Saint-Maurice; du changement de modes de gestion des réservoirs survenu lors de la nationalisation du secteur de l'énergie en 1962; du développement des activités récréotouristiques (nautisme) depuis la décennie 1990; de l'arrêt de la drave à la fin de la décennie 1990; du développement urbain et bien d'autres. Tous ces facteurs peuvent influencer à des degrés divers l'évolution hydro-morphologique du chenal de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle. Étant donné que les débits constituent la variable majeure de l'évolution morphologique des rivières, notre première étape a consisté à analyser la variabilité interannuelle des débits de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle et les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent en hiver et au printemps. En effet, c'est durant ces deux saisons que les changements hydrologiques induits par les barrages et réservoirs sont les plus manifestes (Assani et *al.*, 2005, 2006; Lajoie et *al.*, 2007; Matteau et *al.*, 2009). Ensuite, les changements hydrologiques ont été corrélés aux changements morphologiques. Pour terminer avec l'analyse des facteurs anthropiques susceptibles d'influencer la problématique d'érosion.

5.1 Variabilité hydrologique de la rivière Saint-Maurice et du fleuve Saint-Laurent

5.1.1 Variabilité interannuelle des débits et niveaux d'eau en hiver

En hiver, les débits maximums et moyens journaliers de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle ont significativement augmenté dans le temps. Cette augmentation a été graduelle : elle a commencé dès la mise en service de la centrale et se poursuit maintenant. Deux arguments peuvent être invoqués pour expliquer cette augmentation graduelle.

1. La variabilité naturelle du climat. Une hausse des précipitations pendant l'hiver dans le bassin versant peut provoquer une hausse des débits en raison du fait que pendant cette saison, tout apport d'écoulement naturel n'est pas stocké dans les réservoirs situés en amont. Dans le contexte climatique du Québec, il faut rappeler que les précipitations tombent généralement sous forme de neige inhibant ainsi tout apport naturel d'eau aux cours d'eau par le processus de ruissellement. Pour que la hausse des débits observée en hiver provienne d'un apport naturel, il faut deux conditions : (i) une hausse de la fréquence des précipitations sous forme de pluies générant ainsi un ruissellement et/ou (ii) une hausse des réserves de nappes aquifères qui alimentent les cours d'eau en hiver au Québec. En ce qui concerne les pluies, aucune hausse significative de leur fréquence n'a été observée pendant la période 1950 à 2000 en rive nord (Assani et *al.*, 2011a). Quant à la hausse des réserves de nappes, Assani et *al.* (2011a) ont démontré que la variabilité interannuelle des débits en hiver était corrélée significativement à celle des débits printaniers au Québec. Cette corrélation a été interprétée comme l'influence de la recharge des nappes qui survient principalement au printemps (Larocque et Pharand, 2010) au moment de la fonte de neige sur les débits hivernaux alimentés par les nappes aquifères. Or, en rive nord du fleuve, les débits hivernaux et printaniers ont significativement augmenté pendant la période 1950-2000 (Assani et *al.*, 2011a). Par conséquent, cette hausse des débits hivernaux résultant de la hausse de la recharge des nappes

aquifères au printemps due probablement à une hausse des précipitations hivernales sous forme de neige pourrait expliquer l'augmentation graduelle des débits hivernaux de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle.

2. La hausse de la quantité d'eau lâchée en aval des réservoirs situés en amont de la centrale. Rappelons que pour produire de l'énergie hydroélectrique en hiver, on a construit de nombreux réservoirs en amont et sur de nombreux affluents de la rivière Saint-Maurice. Ces réservoirs ont comme rôle principal d'alimenter en eau les centrales hydroélectriques construites en aval. Ainsi, au printemps, on stocke de l'eau pour remplir les réservoirs et, en hiver, on déstocke de l'eau pour alimenter les centrales hydroélectriques. Ce type de gestion a inversé le cycle hydrologique naturel des débits en aval des réservoirs : les débits maximums surviennent en hiver et les débits minimums au printemps au moment de la fonte de neige. On peut concevoir logiquement qu'en hiver, la quantité d'eau lâchée en aval des réservoirs augmente dans le temps. Cette hausse peut être due à une diminution de la température hivernale qui nécessiterait une hausse de production de l'énergie hydroélectrique ou pour les besoins du marché en raison d'une demande croissante de l'énergie hydroélectrique par les industries, par l'augmentation de la population ou pour le besoin de l'exportation, etc. L'analyse des débits moyens et maximums journaliers en aval de trois plus grands réservoirs (Gouin, Manouane et Taureau) construits en amont de la centrale La Gabelle a révélé une hausse significative des débits en hiver (Assani et *al.*, 2011b). Cependant, cette hausse n'a pas été attribuée à celle de la quantité de l'eau lâchée en aval des réservoirs, mais plutôt à une hausse des débits naturels hivernaux entrant dans les réservoirs. En effet, pendant la période hivernale, la quantité d'eau entrant dans les réservoirs n'est pas retenue, car c'est la période de vidange des réservoirs. Il s'ensuit que si les débits entrant dans le réservoir en hiver augmentent, les débits lâchés en aval de ces réservoirs augmenteront aussi en raison de l'absence de toute rétention d'eau dans les réservoirs. Cette hausse des débits naturels entrant dans les réservoirs en hiver serait due à celle de la recharge des nappes au printemps comme on l'a déjà mentionné.

En ce qui concerne le fleuve Saint-Laurent, les niveaux d'eau moyens en hiver ont significativement diminué entre 1913 et 2008. Cette diminution est survenue en 1979- 1980. Contrairement aux débits de la rivière Saint-Maurice, ce changement a été brusque. Ainsi, le niveau d'eau moyen est passé 5,36 à 4,94 mètres après 1980, soit une diminution de 8 %. Plusieurs facteurs peuvent être invoqués pour expliquer cette diminution :

1. La diminution du niveau du lac Ontario dont le fleuve Saint-Laurent est l'exutoire. En effet, si le niveau d'eau de ce lac diminue, celui du fleuve peut diminuer. Or, l'analyse de la variabilité interannuelle des niveaux d'eau moyens saisonniers du lac Ontario entre 1918 et 2008 montre une hausse significative (figure 5.1). Par conséquent, la cause de la diminution du niveau d'eau du fleuve Saint-Laurent en hiver ne peut être due aux fluctuations du niveau d'eau du lac Ontario. De plus, le niveau d'eau du fleuve est contrôlé par des barrages qui régularisent ses débits et niveaux d'eau et ainsi, cause une augmentation typique de ceux-ci durant la période hivernale, ce qui contredit la diminution observée. Par contre, l'entretien hivernal de la voie navigable et la pose d'estacades peut avoir changé la distribution naturelle des niveaux d'eau en minimisant la fréquence et l'ampleur des embâcles de glace.
2. La diminution des apports des affluents du fleuve. L'analyse de la variabilité interannuelle des débits hivernaux de 18 affluents naturels du fleuve au Québec a révélé une diminution significative des débits hivernaux des affluents situés au sud du 46° N en rive sud entre 1950 et 2000. En revanche, en rive nord, les débits ont significativement augmenté pendant la même période (Assani et *al.*, 2011a). Il est important de mentionner que l'affluent le plus important du fleuve Saint-Laurent est la rivière des Outaouais dont les débits hivernaux ont significativement augmenté en hiver en raison des barrages. À la lumière de ces considérations, on ne peut pas attribuer la baisse du niveau d'eau du fleuve en hiver à la diminution des débits hivernaux des affluents situés au sud du 46° N en

rive sud, car leurs apports en eau est moins importants que ceux des affluents de la rive nord.

3. Les travaux de dragage dans la voie maritime. L'historique des travaux d'entretien effectué sur le fleuve nous a appris qu'à partir de 1979, il y a eu des travaux de dragage dans la voie maritime, et ce, pour une période s'étalant sur une partie de la décennie 1980. Lors de ces travaux d'entretien, plus de 200 000 m³ de sédiments ont été enlevés de la voie maritime et rejetés dans des lacs à proximité des zones draguées. Ces travaux de dragage peuvent ainsi abaisser le niveau du fleuve.

5.1.2 Variabilité interannuelle des débits et niveaux d'eau au printemps

L'analyse des débits moyens et maximums printaniers de la rivière Saint-Maurice n'a révélé aucun changement significatif durant la période 1925 à 2006 malgré une augmentation de la fréquence de crues de récurrence supérieure ou égale à 2 ans durant la décennie 1970. Rappelons que ces crues ont été estimées au moyen de l'analyse régionale d'estimation des crues développée par Anctil et *al.* (1998) pour le Québec. L'occurrence de ces crues signifie que l'écrêtement de crues observé en aval des réservoirs construits en amont de la centrale La Gabelle s'estompe rapidement en raison des apports des affluents naturels. De fait, Assani et *al.* (2011b) ont démontré que toutes les crues de récurrence supérieure ou égale à 2 ans ont presque complètement disparu en aval de tous les grands réservoirs dans le bassin versant du Saint-Maurice.

Les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent ont aussi significativement diminué au printemps. La diminution des niveaux d'eau moyens printaniers est survenue entre 1955 et 1957 (diminution brusque). De fait, le niveau d'eau moyen printanier est passé de 5,67 à 5,32 mètres après 1957, soit une diminution de 6 %. Cette diminution ne peut être attribuée aux fluctuations des niveaux d'eau du lac Ontario dont les niveaux augmentent significativement au printemps (figure 5.1), ni aux apports des affluents dont les débits printaniers ont significativement augmenté en rive nord (Assani et *al.*, 2010, 2011a). Un des facteurs les plus probants qui peut expliquer cette diminution est le creusement de la

voie maritime dans le fleuve dont les travaux ont débuté à la fin de l'année 1954 et se sont terminés avec son ouverture en 1959. Dans une moindre mesure, la régularisation des niveaux d'eau du fleuve par les ouvrages d'ingénierie peut aussi jouer un rôle mineur dans la diminution des niveaux d'eau printaniers.

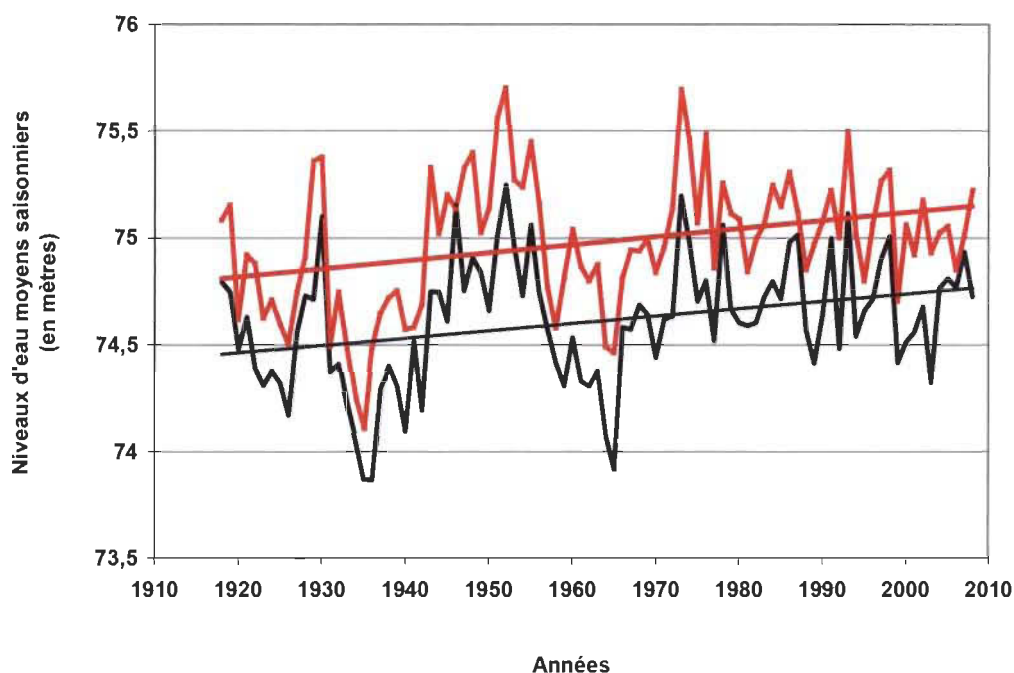


Figure 5.1 Niveaux d'eau moyens saisonniers du lac Ontario (en mètres)
(Rouge : Printemps, Noir : Hiver).

5.2 Relation entre variabilité hydrologique et évolution morphologique de la rivière Saint-Maurice

Les changements hydrologiques décrits ci-dessus ont augmenté le potentiel érosif de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle : hausse progressive des débits hivernaux, absence d'écêtement des fortes crues printanières de récurrence supérieure ou égale à 2 ans; diminution des niveaux d'eau du fleuve en hiver et au printemps. Il est donc logique de s'attendre à une érosion plus ou moins importante du chenal de la rivière Saint-Maurice.

L'étude de la variabilité longitudinale de la largeur à plein bord de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle nous a démontré, par la méthode de

Lombard, deux changements significatifs de la largeur moyenne. Le premier, qui est de type quasi abrupt, serait associé à l'élargissement du chenal en aval de l'affleurement rocheux dans le chenal à l'origine des rapides des Forges. Quant au second changement, de nature progressive et monotonique, il serait lié à l'élargissement naturel du chenal avant sa subdivision en deux principaux bras en amont de sa confluence avec le fleuve Saint-Laurent. Ainsi, les changements longitudinaux de la moyenne de la largeur à plein bord ne seraient corrélés ni aux changements hydrologiques ni à aucune activité anthropique particulière.

Quant à la variabilité temporelle de la largeur à plein bord, l'analyse diachronique des photographies aériennes prises à différentes périodes n'a révélé aucun changement significatif de cette largeur dans le temps. Le phénomène d'érosion présentement constaté par les riverains semble de nature local puisque la problématique ne s'étend pas à l'ensemble du chenal de la rivière. En effet, les phénomènes d'érosion répertoriés sur la rivière sont situés à différents endroits, pour la plupart en milieu urbanisé (zones étudiées : carte de localisation annexe B et photographies des zones annexe D) et ont pour cause une conjugaison de facteurs naturels et anthropiques. Précisons que l'érosion répertoriée le long du Saint-Maurice n'affecte pas que les limites du chenal à plein bord, mais également le ravinement en pente qui semble, après une analyse sommaire, beaucoup plus important. De fait, le matériel raviné peut représenter d'importants volumes et s'accumuler en pieds de pente. Ainsi, la méthode de travail que nous avons utilisée dans le cadre de ce projet de recherche ne nous permettait pas de calculer ce type d'érosion en pente et subséquemment de le mettre en perspective.

Selon Gregory (2006), 73 % des études à propos des impacts des barrages sur la morphologie de la rivière démontrent une diminution de la largeur du chenal et 72 % des études qui examinent les effets de l'urbanisation sur la morphologie des cours d'eau démontrent une augmentation de la largeur du chenal. Dans notre cas, la rivière Saint-Maurice subit les effets conjugués d'un complexe de barrages et des activités humaines ce qui peut influencer de manière contradictoire la variabilité morphologique de celle-ci. De fait, la construction de la centrale La Gabelle et d'autres réservoirs est

antérieure à 1948, année de la première prise des photographies aériennes du chenal. Il est possible que le chenal de la rivière s'était déjà stabilisé avant 1948, soit après la mise en service de la centrale de La Gabelle en 1925 et/ou de la construction d'autres ouvrages en amont. L'analyse des archives historiques (notamment le quotidien régional *Le Nouvelliste*) n'a pas révélé un fait en lien avec le changement qui se serait produit en aval de cette centrale durant les 10 années qui ont suivi sa mise en service. De plus, il est bien connu que plus la taille d'un cours d'eau augmente, moins il réagit aux changements induits par les activités anthropiques. En raison de la taille relativement grande du bassin versant de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de la Gabelle (43 300 km²), la rivière réagirait ainsi peu ou très lentement aux modifications hydrologiques induites par les réservoirs et aux autres activités anthropiques.

En ce qui concerne la variabilité morphologique des îles de l'embouchure de la rivière Saint-Maurice, nous avons pu constater lors de leur analyse par photo-interprétation, une augmentation de leur superficie entre 1948 et 2008. Nous avons répertorié plusieurs phases d'érosion et d'accumulation durant cette période, mais en définitive les phases d'accumulation ont été beaucoup plus importantes que les phases d'érosion. De l'ordre de 7,2 % pour l'île A, 4,1 % pour l'île B et 5,2 % pour l'île C en comparant les superficies des années 1948 et 2008 directement. Mentionnons que l'île A a subi des phases d'accumulation plus importante que les autres îles ce qui peut être dû en partie à son emplacement géographique (amont - dynamique des chenaux). La superficie des îles qui a varié positivement peut être expliquée en partie par les débits printaniers qui sont assez importants pour expliquer les phénomènes d'érosion et de sédimentation. Les dépôts qui se sont accumulés sur les portions nord des îles de l'embouchure proviennent assurément du chenal en aval de la centrale sur la rivière Saint-Maurice puisque le barrage constitue un obstacle infranchissable pour les sédiments (« sediment trap efficiency »). Certaines études ont démontré qu'il y avait une réduction significative de la charge en sédiments en aval des rivières consécutivement à la construction de barrages hydroélectriques (Williams et Wolman, 1984; Brandt, 2000). Tout dépendant de la taille du réservoir, une grande quantité de sédiments vont être stockés ne relâchant ainsi qu'une infime portion de ceux-ci en aval du barrage. Les

dépôts accumulés sont donc susceptibles de résulter de trois autres sources soit de l'érosion des berges en amont des îles, de l'érosion du lit de la rivière (augmentation de la profondeur) ou de l'érosion des affluents situés en aval de la centrale La Gabelle.

Néanmoins, il est important de mentionner que les îles de l'embouchure de la rivière Saint-Maurice (A, B et C) ont aussi subi durant cette période des phénomènes d'érosion assez significatifs dans certaines sections. En majeure partie, cette érosion est répertoriée dans les portions les plus anthropisées (plage, usine, quai, etc.) et les plus près du fleuve Saint-Laurent ce qui peut être dû, entre autres, au marnage du fleuve, au batillage généré par les bateaux commerciaux qui utilisent la voie maritime et aux fluctuations naturelles des niveaux d'eau saisonniers. Par exemple, depuis 1948 l'île B a subi abondamment d'accumulation dans sa section amont, mais considérablement d'érosion au niveau de sa section aval, soit au niveau de la plage de l'île St-Quentin (annexe C). Les deux processus (érosion/sédimentation) sont donc actifs dans des proportions différentes et à des emplacements distincts.

En somme, concernant la relation entre la variabilité hydrologique et l'évolution morphologique de la rivière Saint-Maurice, la diminution des niveaux d'eau saisonniers du fleuve Saint-Laurent conjuguée avec l'augmentation des débits hivernaux peut entraîner l'augmentation de la capacité érosive de la rivière. En effet, si le niveau d'eau du fleuve Saint-Laurent diminue, cela implique une diminution du niveau de base de la rivière Saint-Maurice, ce qui est susceptible d'entraîner une augmentation de la pente du cours d'eau et ainsi, augmenter la puissance spécifique des débits. Cette augmentation pourrait être assez importante pour accroître la capacité érosive de la rivière et entraîner des phénomènes d'érosion/sédimentation. Mentionnons aussi qu'un des effets possibles de l'augmentation des débits hivernaux est la formation du couvert de glace qui pourrait être retardée au début de l'hiver. De fait, l'augmentation du courant dans le chenal pourrait engendrer un couvert de glace discontinu où certaines zones seraient susceptibles de rester totalement libres de glace (GDG Environnement, 1994d). Les berges non protégées (stabilisées) par les glaces sont plus sensibles à l'érosion si toutes les couches de sol ne sont pas totalement gelées (Oygarden, 2003).

Quant aux débits printaniers de la rivière Saint-Maurice, ils sont aussi susceptibles de provoquer un phénomène d'érosion accru, et ce, même si ceux-ci n'ont pas subi de changement significatif. En effet, la modification du niveau du fleuve combinée à des débits printaniers élevés en période de fonte des neiges, sont possiblement assez puissant pour éroder ou déstabiliser les berges de la rivière. Rappelons que les débits printaniers, associés à la période de fonte des neiges, ont généralement un pouvoir érosif plus grand, ceux-ci étant plus élevés que les autres débits enregistrés durant le reste de l'année. De fait, les plus grands épisodes d'érosion surviennent au cours des périodes de fontes de neige puisque celle-ci amène de grandes quantités d'eau vers le cours d'eau (ruissellement) et engendre une augmentation significative et soudaine des débits. Selon Oygarden (2003), ce qui rend les couches de sols plus susceptibles de subir énergiquement de l'érosion en période de fonte, c'est les couches de sol gelées en profondeur qui agissent comme des substrats imperméables et qui mènent ainsi les couches supérieures à la saturation.

Il est aussi important de noter que les fluctuations journalières du niveau d'eau du fleuve peuvent influencer à divers degrés la dynamique fluviale de l'embouchure de la rivière Saint-Maurice. En effet, la Saint-Maurice subit un marnage d'environ 0,2 mètre lors d'une marée moyenne et de 0,3 mètre lors de grande marée. De plus, la variation moyenne mensuelle du fleuve varie entre 0,7 et 3 mètres (Hydro-Québec, 2004). Lors de période de fonte des neiges au printemps, la variabilité du niveau du fleuve est encore plus grande de l'ordre de 2 à 3 mètres selon l'agence océanique du Bas Saint-Laurent. Le marnage du fleuve peut donc influencer les phénomènes d'érosion et de sédimentation au niveau de l'embouchure de la rivière Saint-Maurice incluant la portion urbaine et les îles de l'embouchure.

Finalement, les résultats obtenus avec l'analyse de l'évolution morphologique de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale de La Gabelle, nous indiquent que la variabilité hydrologique de la rivière et du fleuve n'explique pas en totalité la variabilité morphologique constatée à l'échelle locale. Effectivement, la variation des débits et niveaux d'eau dans le temps, certes, amplifie le phénomène d'érosion, mais ne constitue

pas le facteur principal puisque la problématique d'érosion n'est pas constante à l'échelle du cours d'eau. L'érosion subie par la rivière Saint-Maurice est donc un phénomène local lié, entre autres, aux activités anthropiques immédiates.

5.3 Les impacts des activités anthropiques sur la morphologie locale de la rivière Saint-Maurice

L'analyse des impacts des activités anthropiques sur la morphologie locale de la rivière Saint-Maurice nous a démontré que la détérioration de la qualité de la bande riveraine et le démantèlement des estacades sont susceptibles d'avoir des effets néfastes importants sur les berges.

En ce qui concerne la qualité des bandes riveraines, l'indice utilisé dans le cadre de cette recherche (IQBR) nous illustre bien la tendance de la végétation qui recouvre les berges urbaines de la rivière à se dégrader (secteur Trois-Rivières/Cap-de-la-Madeleine). Nous avons remarqué que les rives situées à proximité des zones urbaines ou à l'intérieure de ces zones, soit à l'embouchure du Saint-Maurice, ont un indice de qualité des bandes riveraines plus bas que les berges se trouvant plus éloignées de seulement quelques kilomètres. En effet, l'urbanisation du territoire semble dégrader l'aspect naturel et fonctionnel des rives. La construction de nouvelles structures humaines en bordure de la rivière Saint-Maurice peut affecter la charge en sédiment (augmentation) et l'écoulement de l'eau localement (Gregory, 2006). Par contre, la conservation d'une strate arborescente sur une bonne partie de la surface étudiée semble stabiliser la qualité de l'habitat à un niveau intermédiaire de perturbation. Selon Odgaard (1987), les berges munies d'arbres matures ont un risque deux fois plus faible de subir de l'érosion. St-Jacques et *al.* (1998) ont mentionné que le développement urbain, agricole, commercial et industriel qui résulte des activités humaines affecte le milieu aquatique de plusieurs façons : il pollue, modifie et détruit l'habitat naturel des rives. L'expansion des activités humaines directement en bordure des cours d'eau pourrait donc avoir un effet sérieux sur le milieu aquatique et terrestre. L'augmentation du ratio « infrastructure-forêt » en zone urbaine nous indique clairement la dégradation de l'habitat et contribue à fragiliser les rives. Rappelons que les bandes riveraines sont reconnues pour leurs

multiples rôles, entre autres, la stabilisation des berges et la protection de celles-ci contre l'érosion des sols. Le réseau racinaire des trois strates de végétations (herbacée, arbustive et arborescente) agit comme agent antiérosif, en stabilisant la berge et en retenant le sol de manière plus cohésive (St-Jacques, 1998). D'autres études corroborent les conclusions et démontrent l'efficacité de la végétalisation des rives comme moyen de prévention de l'érosion du sol (MDDEP, 2007; Hallot et *al.* 2005).

À propos des effets du démantèlement des estacades, l'examen des photographies aériennes de 1993 et 2008, nous a permis de faire des constats généraux. Le démantèlement a semblé nuire à l'aspect naturel des rives c'est-à-dire que la rivière Saint-Maurice est devenue intéressante pour le développement des activités nautiques. Il y a donc eu l'emplacement de nouvelle commodité nautique (quai, descente de bateau, marina). Ceci a entraîné la dénaturalisation des berges et la mise à nu du sol à certains endroits. Ces actions peuvent provoquer la fragilisation des berges aux processus d'érosion comme mentionné précédemment. D'après Saint-Laurent (2002), la rivière Saint-Maurice était auparavant moins susceptible de subir activement les processus d'érosion des berges puisque la présence des estacades de flottage de bois le long des rives protégeait celles-ci de l'effet du batillage.

Au niveau provincial, des données statistiques sur la navigation de plaisance démontrent une augmentation croissante du nombre de ménage ayant une embarcation passant de 452 309 ménages en 1995 à 509 258 ménages en 2000, soit une augmentation de 12,6 % (Étude sur la navigation de plaisance – Pêches et Océans Canada, 2004). Les données sur la navigation de plaisance de 1995 et de 2000 démontrent que le nombre de plaisanciers au Québec suit la même tendance que le nombre de ménage. Il serait donc possible de constater une hausse du nombre de plaisanciers depuis 2000, ce qui pourrait emmener la rivière Saint-Maurice à des conflits entre les différents utilisateurs. Le type d'embarcation qui peut générer des impacts significatifs sur les berges d'un cours d'eau en produisant du batillage, sont les bateaux à moteur qui comptent pour 20 % et les motomarines qui sont en forte augmentation et représentent 6 % de la totalité des embarcations répertoriées au Québec (836 819 embarcations). En ce qui concerne la

région de la Maurice et du Centre-du-Québec (axe de navigation – Lac St-Pierre/Fleuve Saint-Laurent), les données régionales nous démontrent que la possession d'embarcation de plaisance est légèrement supérieure à la moyenne québécoise avec 19 % contre 17 % et que les marinas sont de plus grandes dimensions que la moyenne québécoise (147 places versus 114 places).

Ces données nous démontrent l'engouement des Québécois face à ce type d'activités et nous révèlent que les aspects concernant la sécurité nautique autant pour les utilisateurs que pour les riverains devraient être révisés. Rappelons que le passage des embarcations motorisées peut provoquer un phénomène d'érosion des berges d'intensité différentes, selon la taille des bateaux, leur vitesse, la fréquence des passages ainsi que la distance des embarcations par rapport à la rive (Dauphin, 2000). De fait, la vitesse des embarcations de plaisance ou commerciale joue un rôle non négligeable puisque la hauteur de vague qui ne causerait pas de dommage significatif aux berges est de 12,5 cm ce qui est caractéristique d'une vitesse inférieure à 10 km/h (State of Minnesota, 1993).

L'arrêt du flottage du bois a aussi entraîné le nettoyage de la rivière Saint-Maurice et est susceptible d'avoir eu des effets sur l'écoulement. En effet, Gregory (2006) mentionne que les débris de bois peuvent occuper 2 % du lit d'un cours d'eau, mais compte pour 50 % de la résistance à l'écoulement. Si l'enlèvement des débris de bois dans les cours d'eau a des effets sur l'écoulement, ceux-ci se transposent obligatoirement sur la morphologie de la rivière puisque les variables hydrologiques influencent le transport de sédiments qui influence les aspects morphologiques à divers degrés.

Finalement, le démantèlement récent des estacades (1997-1998) et l'augmentation récente des activités de plaisance risquent d'augmenter significativement la sensibilité des berges à l'érosion. Si l'on combine ces données avec la détérioration des bandes riveraines en milieu urbain et l'urbanisation grandissante du territoire et des rives, les berges sont susceptibles d'en subir les contrecoups.

5.4 Conclusion

La variabilité interannuelle des débits de la rivière Saint-Maurice depuis la construction de la centrale La Gabelle a été caractérisée par une hausse significative graduelle des débits en hiver. Cette hausse pourrait être liée à une augmentation de la recharge des nappes aquifères au printemps, qui alimentent les débits hivernaux, car le surplus d'eau apporté par les nappes n'est pas retenu dans les réservoirs. Au printemps, aucun changement significatif des débits ne fut observé. Ainsi, les fortes crues de récurrence supérieure ou égale à deux ans surviennent toujours malgré leur disparition en aval des réservoirs construits en amont de la centrale. Quant aux niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent, ils ont significativement diminué en hiver et au printemps. Cette diminution est en relation avec le creusement de la voie maritime durant le milieu de la décennie 1950 et les travaux de dragage effectués ultérieurement durant la décennie 1980. Notons que la présence de plusieurs ouvrages d'ingénierie qui régularisent les débits d'eau du fleuve peut aussi avoir influencé les régimes hydrologiques à divers degrés selon le secteur et la saison. Au cours des dernières décennies, les nombreuses interventions humaines (dragage, entretien hivernal, pose d'estacades, construction de réservoirs, îles, ponts, tunnels, ouvrages de régulation) ont eu des répercussions sur le patron d'écoulement du fleuve et ont eu une incidence directe sur le niveau d'eau. Tous ces changements hydrologiques sont susceptibles d'augmenter le pouvoir érosif de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle.

Cependant, malgré cette augmentation du potentiel érosif de la rivière, aucun changement significatif de la largeur moyenne en plein bord ne fut observé. Depuis 1948, il n'y a pas eu un élargissement généralisé du chenal en raison de l'érosion des berges. Néanmoins, le ravinement en pente, non inventorié dans ce cadre précis, qui peut être en fait largement plus important que l'érosion du chenal plein bord, peut expliquer en partie nos conclusions de recherche négative au niveau de l'élargissement du chenal. En ce qui concerne les îlots, leur superficie a augmenté au fil du temps. Cette augmentation résulte de l'accumulation du sable transporté par la rivière. Ce sable proviendrait de l'érosion locale des berges provoquée par la conjugaison de facteurs anthropiques, notamment le démantèlement des estacades, et naturels (hauteur des talus,

penne, constitution des berges, conditions climatiques). Nos résultats démontrent des tendances et des faits intéressants qui pourront être utilisés ultérieurement dans le cadre de l'élaboration d'un plan pour une bonne gestion et conservation du milieu riverain et aquatique du tronçon La Gabelle-Trois-Rivières de la rivière Saint-Maurice.

Enfin, l'évolution morphologique du chenal de la rivière Saint-Maurice en aval de la centrale La Gabelle ne correspond à aucun modèle d'évolution morphologique des chenaux en aval des barrages proposé dans la littérature scientifique (Brandt, 2000). Cette différence pourrait être attribuée à l'interaction de nombreux facteurs alors que ces modèles sont fondés sur les changements hydrologiques et sédimentologiques induits exclusivement par les barrages.

BIBLIOGRAPHIE

Alibert, M. (2007) « Relation entre périodes hydroclimatiques et changement morphologique du chenal principal et des méandres abandonnés de la rivière Matawin en amont du réservoir Taureau » Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, UQTR, 69 p.

Anctil, F., Martel, N., Hoang V.D. (1998) « Analyse régionale des crues journalières de la province de Québec », Revue canadienne de génie civil 25 (2) : 360-369.

Assani, A.A., Petit, F. (2003) "Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of the Warche river (Belgium)", Earth Surface Processes and Landforms 29 : 133-143.

Assani, A.A. (2004) « Comparaison de la variabilité interannuelle des débits en fonction de régimes hydrologiques artificialisés dans un complexe de barrages sur la rivière Saint-Maurice (Québec) », Bulletin de la Société géographique de Liège 44 : 87-96.

Assani, A., Gravel É., Buffin-Bélanger, T., Roy, A.G. (2005) « Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada) », Revue des Sciences de l'eau 18 : 103-127.

Assani, A., Landry, R., Laurencelle, M. (2011a) « Comparaison of interannual variability modes and trends of seasonally precipitation and streamflow in southern Québec (Canada) », River research and applications DOI: 10.1002/rra.1544

Assani, A., Landry, R., Daigle, J. et Chalifour A. (2011b) «Reservoirs Effects on the Interannual Variability of Winter and Spring Streamflow in the St-Maurice River Watershed (Quebec, Canada) », Water Resources Management 25 : 3661–3675.

Astrade, L. (1998) « La gestion des barrages-réservoirs au Québec: exemples d'enjeux environnementaux », Annales de géographie 604 : 590-609.

BVSM - Bassin versant de la rivière Saint-Maurice (2007) « Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Saint-Maurice », Alliance environnement, 4, 511 p.

Baxter, R.M., Glaude, P. (1980) « Les effets des barrages et des retenues d'eau sur l'environnement au Canada: Expérience et perspectives d'avenir », Bulletin des sciences halieutiques et aquatiques 205F.

Brandt, S. A. (2000) "Classification of geomorphological effects downstream of dams", *Catena* 40 : 375-401.

Bravard, J-P., Petit, F. (2000) « Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial », Collection U, Armand Colin, Paris, 222 p.

Brien, M. (2006) « Mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau dans la portion agricole du bassin versant de la rivière des Envies (Québec) », Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, UQTR, 131 p.

Brierley, G.J., Fryirs, K.A. (2005) « Geomorphology and river management », Blackwell Publishing, Australia, 398 p.

Chien, N. (1985) « Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs », *Earth Surfaces Processes and Landforms* 10 : 143-159.

Dauphin, D. (2000) « Influence de la navigation commerciale et de la navigation de plaisance sur l'érosion des rives du Fleuve Saint-Laurent dans le tronçon Cornwell-Montmagny », Rapport final, Ministère du transport du Québec, 103p. + cartes et annexes.

Davey, G.W., Doeg, T.J., Blyth, J.D. (1987) « Changes in benthic sediment in the Thomson River, southeastern Australia, during construction of the Thomson Dam », *Regulated Rivers* 1 : 71-84.

Diehl, T. H. (1997) « Potential drift accumulation at bridges », USDT, FHT, 97p.

Fortier, C., Assani A.A., Mesfioui, M., Roy, A.G. (2010) « Comparison of the interannual and interdecadal variability of heavy flood characteristics upstream and downstream from Matawin Dam (Québec, Canada). », *River Research and applications* 27 : 1423.

Freyteinson, S. (1995) « Effects on river regulations on winter environment experience from Iceland », The National Power Company, CRIPE, 251-258.

Galster, J. C., Pazzaglia F.J., Germanoski D. (2008) « Measuring the impact of urbanization on channel widths using historic aerial and modern surveys », *Journal of the American water resources association* 44 : 948-960.

GDG Environnement. (1994d) « État des connaissances environnementales du bassin de la rivière Saint-Maurice », Rapport présenté à Environnement Canada, 90 p.

Giret, A. (2007) « Hydrologie fluviale », Ellipses, Paris, 262 p.

Graf, W.L. (2006) « Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers », *Geomorphology* 79 : 336-360.

Gregory, K.J. (1992) « Identification of river channel change due to urbanization », *Applied geography* 12 : 299-318.

Gregory, K. J., 2006. « The human role in changing river channels », *Geomorphology* 79 : 172-191.

Groupe HBA Experts-conseils. (1998) « Dérivation partielle de la rivière Mégiscane, Étude de faisabilité – Morphosédimentologie des berges actuelles et futures des plans d'eau », 118 p.

Guerrero, A. (1995) « Grand-Mère, Avant-projet, phase II – Résumé des observations des couverts de glace du Bas Saint-Maurice », Service hydraulique, Hydro-Québec, Rapport no 14320-RA-95-49.

Gurnell, A.M. (1997) « Channel change on the river Dee meanders, 1942-1992, from the analysis on air photographs », *Regulated Rivers: Research and Management* 13 : 13-26.

Hallot, É., Petit F., Verniers G. et Lambot F. (2004) « Utilisation des techniques végétales pour la stabilisation des berges: Suivi de chantiers réalisés dans différents types de rivières Wallonnes », Laboratoire d'hydrographie et de géomorphologie fluviale (ULg), - DCENN (DGRNE), 173-178.

Hardy, R., Séguin, N. (2004) « Histoire de la Mauricie », Éditions de l'IQRC, Les Presses de l'Université Laval, 1139 p.

Hill, D.F., Beachler M.M., Johnson, P.A. (2002) « Hydrodynamic impacts of commercial Jet-Boating on the Chilkat River, Alaska », Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, 114 p.

Hubert, K. (2011) « Effets des changements des caractéristiques de crues sur l'évolution morphologique de la rivière Matawin en aval du réservoir Taureau (Québec, Canada) », Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, UQTR.

Hydro-Québec. (1996) « Avant-projet, centrale Grand-Mère, phase II – Étude sur la stabilité du couvert de glace », Rapport no 14330-RA-96-02.

Hydro-Québec. (2004) « Rivière Saint-Maurice – Étude de rupture du barrage Gouin », Rapport no. RA-051-33.

Hughes, M.L., McDowell, P.F., Andrew M.W. (2006) « Accuracy assessment of georectified aerial photography: Implications for measuring lateral channel movement in a Gis », *Geomorphology* 74 : 1-16.

Kondolf, G., Piégay H. (2003) « Tools in fluvial geomorphology », John Wiley and Sons Ltd, Canada, 688 p.

Kundzewicz, Z.W. et al. (2005) « Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow », *Hydrological journal* 50 (5) : 1-810.

Lajoie, F., Assani, A., Roy, A.G., Mesfioui, M. (2007) « Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons », *Journal of hydrology* 334 : 423-439.

Larocque, M., Pharand, M-C. (2010) « Dynamique de l'écoulement souterrain et vulnérabilité d'un aquifère du piémont appalachien (Québec, Canada) », *Revue des sciences de l'eau* 23 : 73-88.

Lassetre, N.S., Piégay, H., Dufour S., Rollet A-M. (2008) « Decadal changes in distribution and frequency of wood in a free meandering river, the Ain river, France », *Earth Surface Processes and Landforms* 33 : 1098-111.

Laurencelle, M. (2008) « Utilisation de la géomatique pour l'analyse de l'évolution morphologique du chenal de la rivière Mattawin et autres analyses statistiques », Rapport de stage, UQTR, 81 p.

Lawler, D.M. (1987) « Bank erosion and frost action: an example from South Wales In *International Geomorphology* », 1986 I, Gardiner, V., Wiley, 575-590.

Lawler, D.M. (1993) « The measurement of the river bank erosion and lateral channel change: A review », *Earth Surface, Processes and Landforms* 18 : 777-821.

Le Hay, Y.F., Piégay, H. (2007) « Le bois mort dans les paysages fluviaux français : éléments pour une gestion renouvelée », *Espace géographique* 36 : 51-64.

Matteau, M., Assani, A., Mesfioui, M. (2009) « Application of multivariate statistical methods to the dams hydrologic impact studies », *Journal of hydrology* 371 : 120-128.

MDDEP - Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs. (2007) « Guide d'interprétation, Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables », Direction des politiques de l'eau, Les publications du Québec, 148 p.

Michelli, E.R., Kirchner, J.W. (2004) « Quantifying the effects of the riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, Central Sacramento River, California, USA », *River Research and Application* 20 : 537-548.

MEO - Ministère de l'environnement de l'Ontario. (2003) « Stormwater Management Planning and Design Manual », Aquafor Beech Ltd. et Marshall Macklin Monaghan Ltd., 32p.

Moulin, B., Piégay, H. (2004) « Characteristics and temporal variability of large woody debris trapped in a reservoir on the river Rhone(Rhone): Implications for river basin management », *River Research and Applications* 20 : 79-97.

Oygarden, L. (2003) « Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway », *Catena* 50 : 217-242.

Odgaard, A.J. (1987) « Streambank erosion along two rivers in Iowa », *Water Resources Research* 23 : 1225-1236.

Petts, G.E. (1987) « Times-scales for ecological change in regulated rivers », *Regulated Streams. Advances in ecology*, New York, 257-266.

Petts, G.E., Gurnell A.M. (2005) « Dams and geomorphology : Research progress and future directions », *Geomorphology* 71 : 27-47.

Quessy, J.F., Favre, A.-C., Saïd M., Champagne M. (2011) « Statistical inference in Lombard's smooth change model », *Environmetrics*.

Richards, K. (1982) « Rivers, Form and Process in Alluvial Channels », Methuen, London, 358p.

Robitaille, A., Saucier J-P. (1998) « Paysages régionaux du Québec méridional », Les Publications du Québec, 213 p.

St-Jacques, N., Richard, Y. (1998) « Développement d'un indice de qualité de la bande riveraine : application à la rivière Chaudière et mise en relation avec l'intégrité biotique du milieu aquatique », Direction des écosystèmes aquatiques, Ministère de l'environnement et de la faune, *envirodoq* no EN980022 : 6.1 à 6.41.

Saint-Laurent, D. (2002) « Phénomène d'érosion fluviale et conditions hydrodynamiques de la rivière Saint-Maurice, Québec, Canada », BELGEO 2 : 109-131.

Schmidt, J.C., Wilcock P.R. (2008) « Metrics for assessing the downstream effects of dams », Water Resources Research 44 : 4.

Shields, F.D., Smith R.H. (1992) « Effects of large woody debris removal on physical characteristics of sand-bed river », Aquatic conservation, marine and freshwater ecosystems 2 : 145-163.

State of Minnesota, Department of natural resources. (1993) « Mississippi, River bank erosion and boating. Facts and solutions », Dépliant.

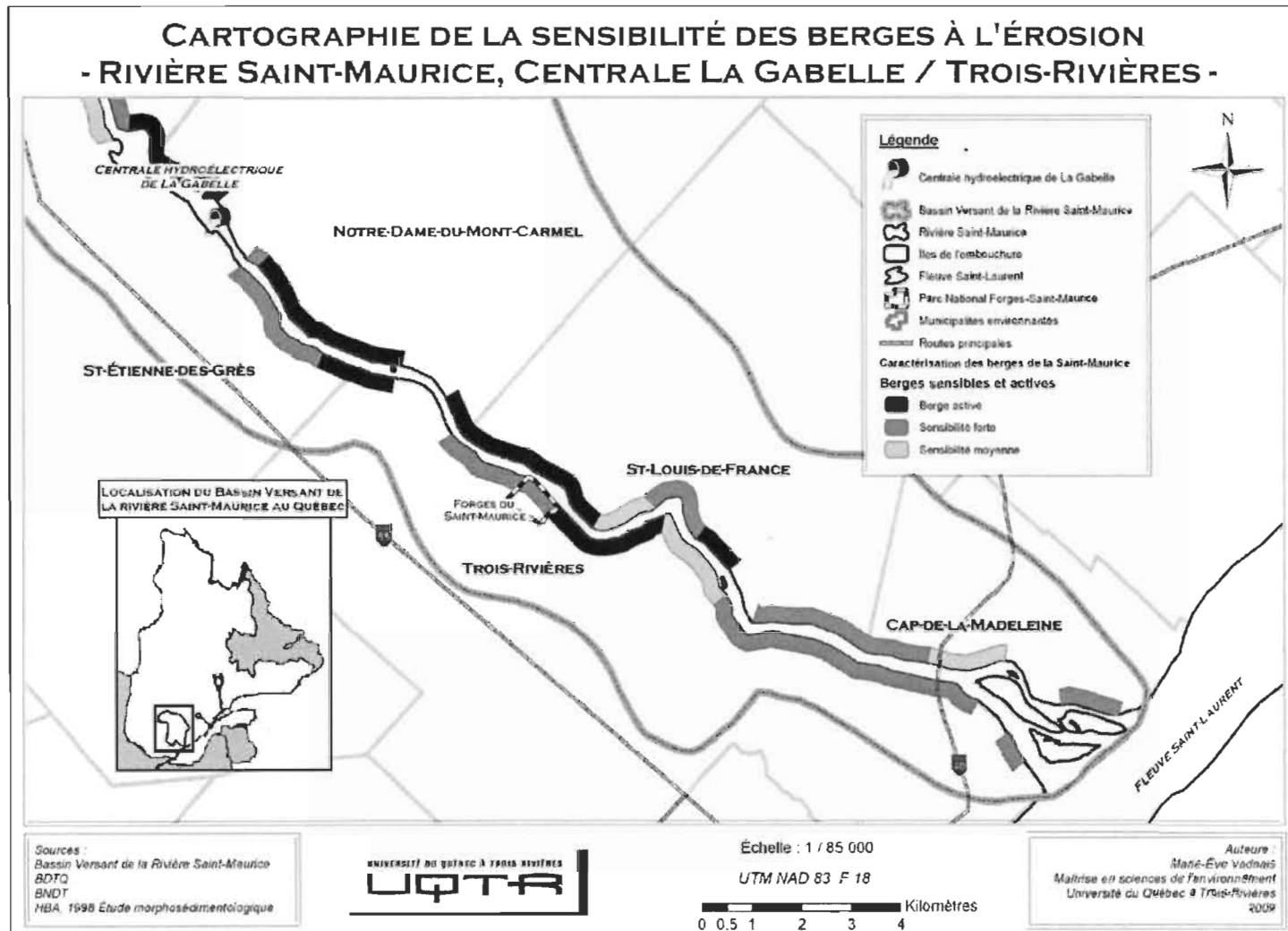
Thorne C.R. (1982) « Processes and mechanisms of river bank erosion », Gravel-bed Rivers: fluvial processes, engineering and management, 227-271.

Williams, G.P., Wolman G. (1984) « Downstream effects of dams on alluvial rivers », Geological survey professional paper 1286. Supt. Of Docs. No.: 119.16:1286.

Winterbottom, S.J., Gilvear D.J. (2000) « A Gis-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: Regulated river Tummel, Scotland », Regulated rivers: Research and Management 16 : 127-140.

Wolman, G. (1967) « A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels », Geographiska Annaler, Serie A, Physical Geography 49 : 385-395.

Zufelt, J.E. (1995) « The effects of hydropower peaking operations on the thickness of ice accumulation », Research Hydraulic Engineer : 43-57.



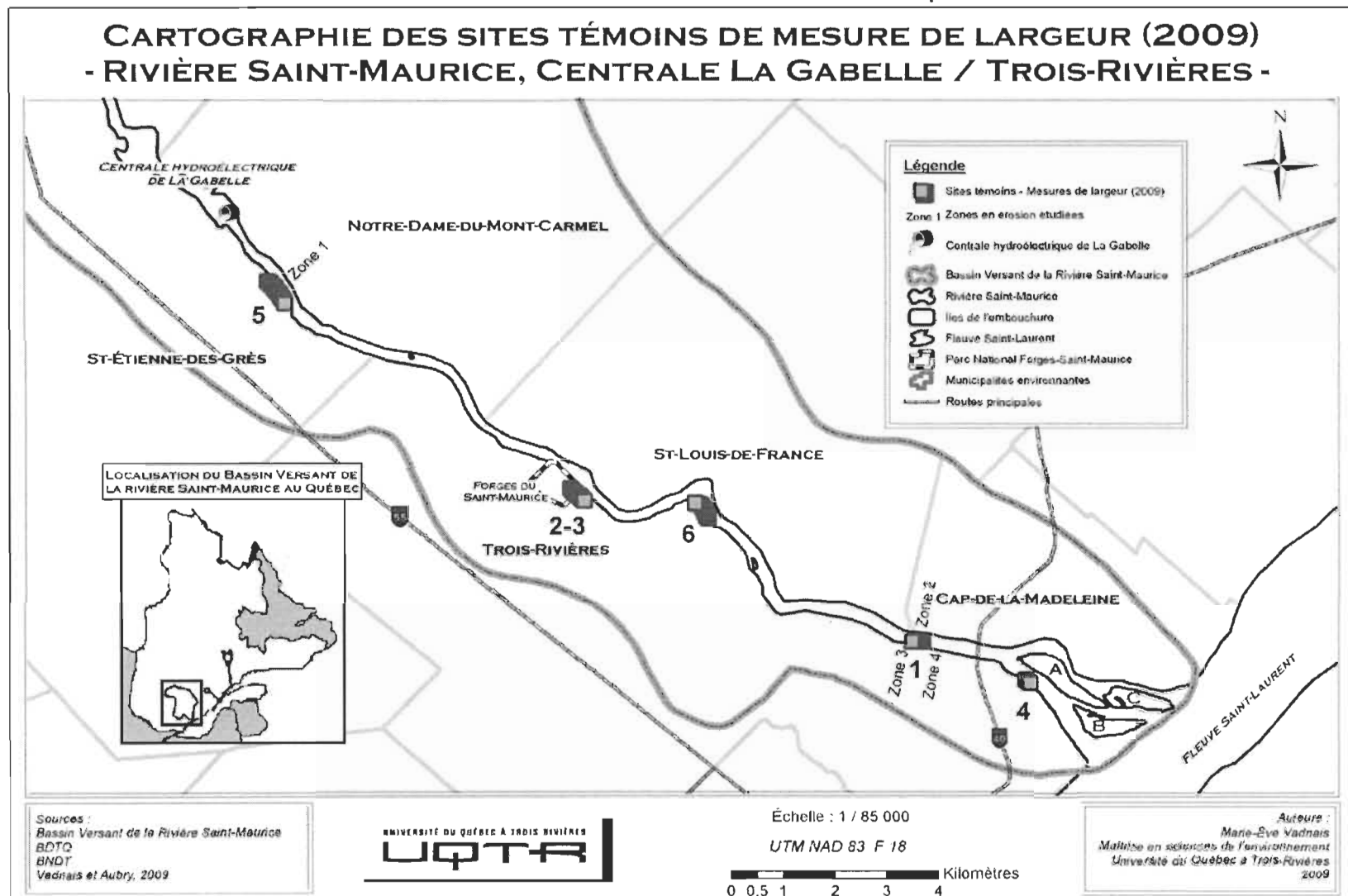
ANNEXE B

Comparaison des largeurs moyennes du chenal de la rivière Saint-Maurice (en mètres)
Mesures de terrains (été 2009) versus mesures de photographies aériennes (2008)

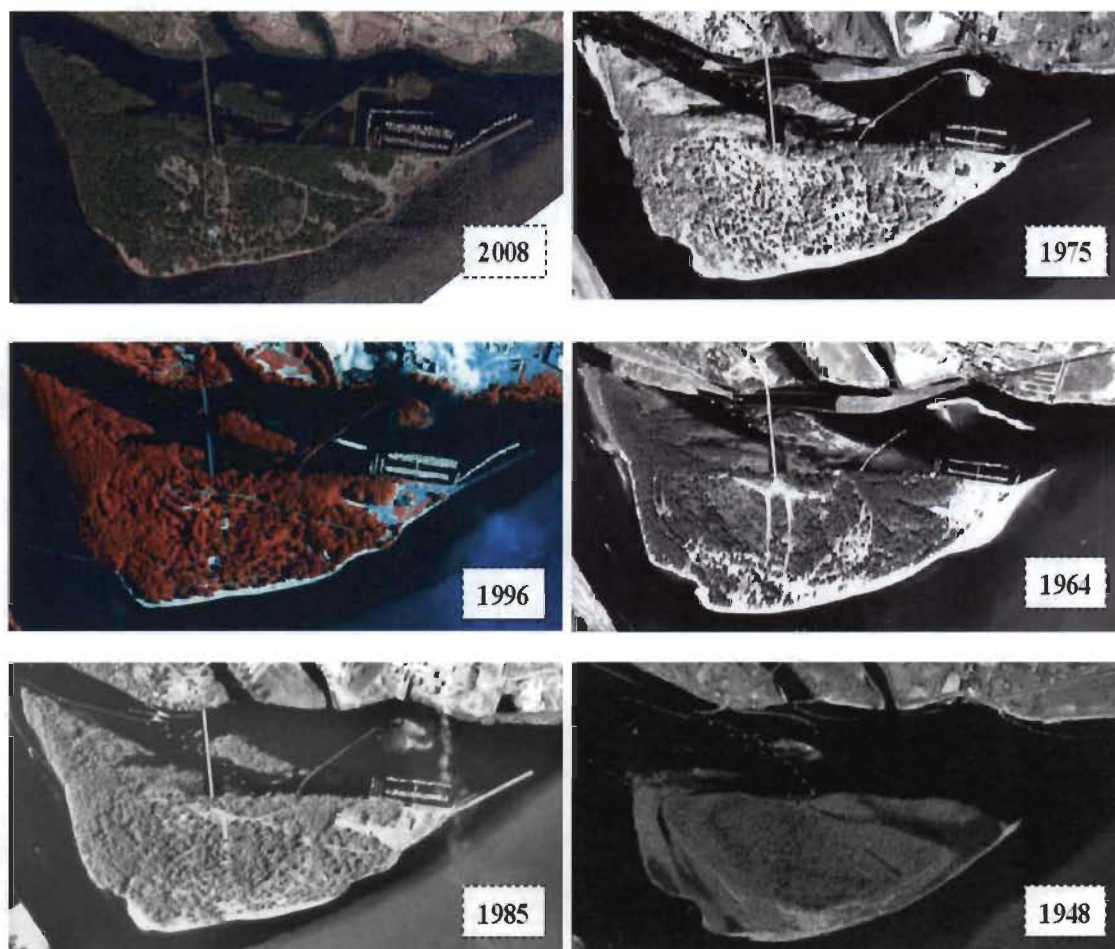
Sites témoins	Validation terrain Télémètre	Photographies 2008	Nombre de mesure	Erreur moyenne (m)	Erreur minimum (m)	Erreur maximum (m)
1	235,7	234,7	10	1	0,1	6
3	289	289,7	6	0,7	0,5	4,8
5	256,7	258	8	1,3	0,3	3
6	208,1	207,4	12	1,3	0,2	4

Validation du télémètre sur le terrain (en mètres)

Point	Section	Télémètre Test 1	Télémètre Test 2	Télémètre Test 3	Direction	Distance mesurée (m)	Erreur moyenne (m)
A	Normand / Blvd des Estacades	39	41	41	B vers A	40	1
B	Normand / Blvd des Estacades	39,5	39,5	39,5	A vers B	40	0,5
C	Normand / Blvd des Estacades	80	80,5	81	C vers A	80	0,5
D	Barrage La Gabelle	39,5	41,5	40	D vers E	40	0,666
E	Barrage La Gabelle	40	40	40	E vers D	40	0
F	Barrage La Gabelle	81	81	81	F vers D	80	1

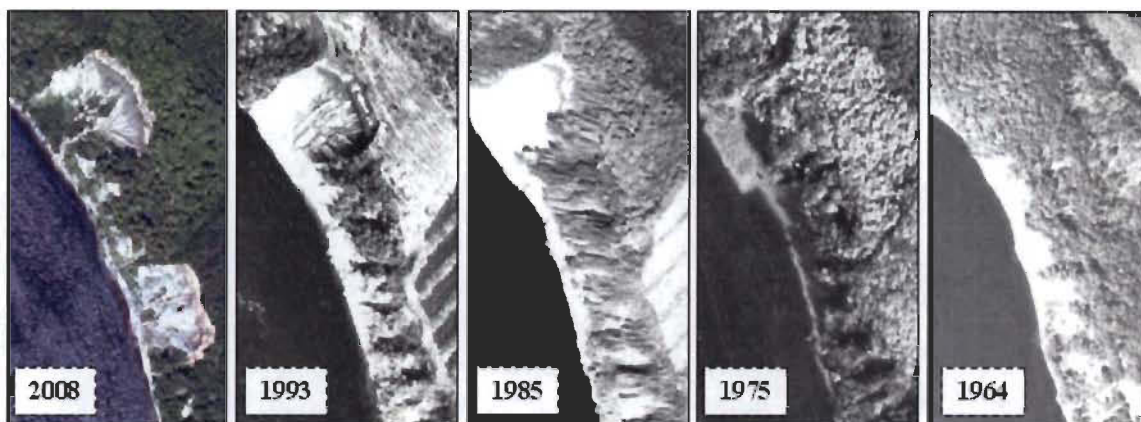


ANNEXE C

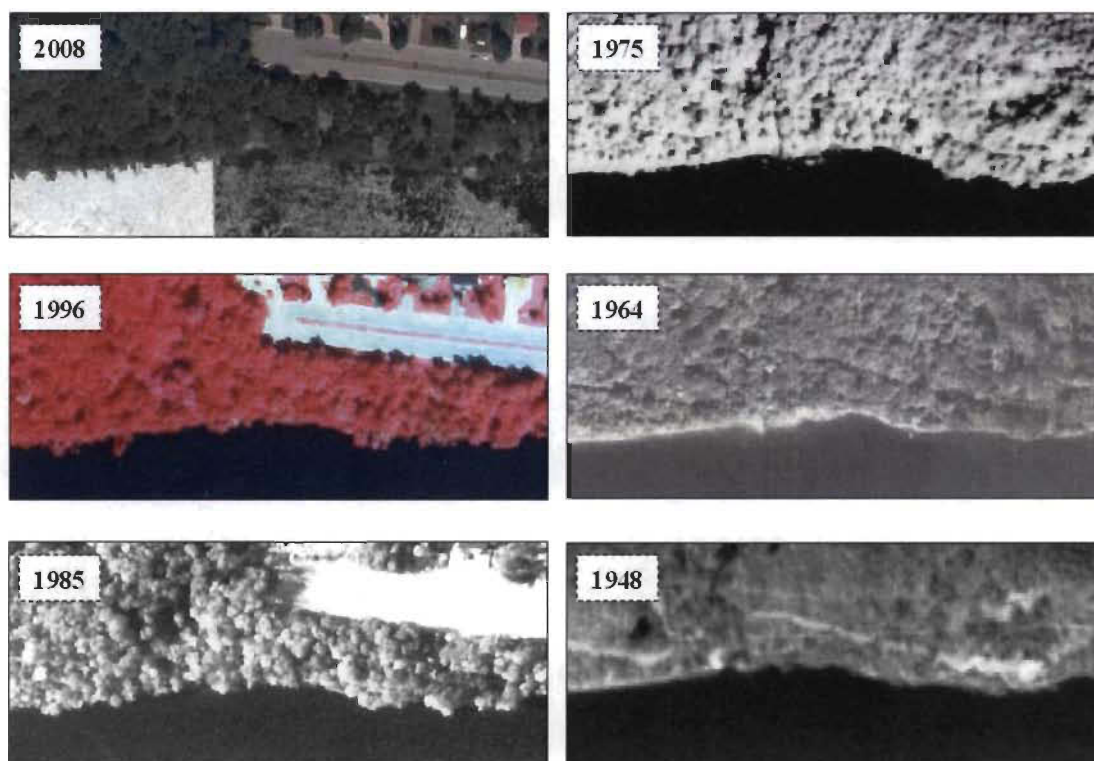


Évolution de la superficie et de la forme de l'île B.

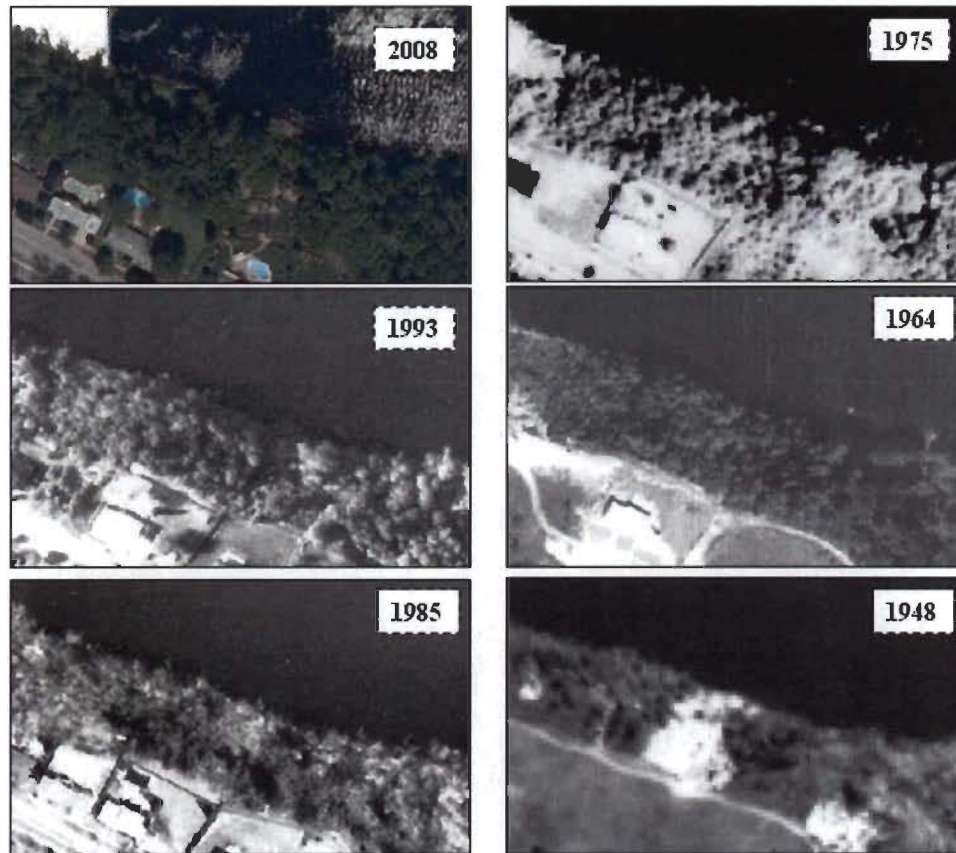
ANNEXE D



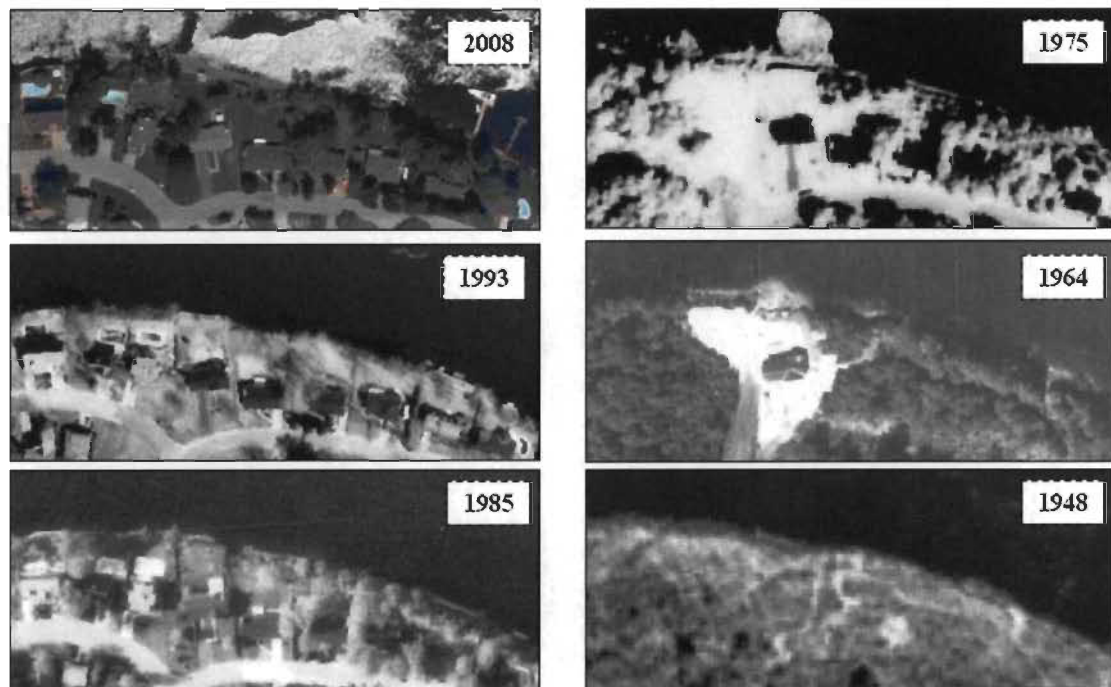
Zone 1



Zone 2



Zone 3



Zone 4